VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM



ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ

ОЧИСТКА ВОЗДУХА

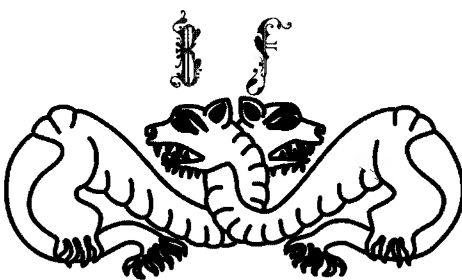
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ОЧИСТКА ВОЗДУХА

ПОД РЕДАКЦИЕЙ
П. УАЙТА и С. СМИТА

Перевод с английского
Б. И. МЯГКОВА и В. Г. ЛАПЕНКО
под редакцией канд. хим. наук Б. И. МЯГКОВА



АТОМИЗДАТ
Москва 1967



УДК 62-733

HIGH-EFFICIENCY AIR FILTRATION

EDITORS

P. A. F. WHITE, B.Sc., M.I.Chem.E.

and

S. E. SMITH, B.Sc., A.R.I.C., M.I.Chem.E.

LONDON

BUTTERWORTHS

1964

2—3—7
82—67

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

С развитием атомной энергетики, радиоэлектроники, приборостроения, промышленной микробиологии и биохимии и других новых отраслей промышленности возникла проблема высокоэффективной очистки воздуха и технологических газов от взвешенных в них субмикронных частиц. Это вызвано как опасностью радиоактивных аэрозолей и высокой токсичностью некоторых металлов и соединений, так и необходимостью получения совершенно чистого технологического воздуха.

Наряду с усовершенствованием всех типов пылеулавливающего оборудования и систем вентиляции на предприятиях и в лабораториях широкое применение получили тонковолокнистые фильтры, способные обеспечить ультратонкую, а в некоторых случаях полную очистку от частиц всех размеров из больших объемов воздуха.

Этой актуальной проблеме и посвящена настоящая книга, написанная известными английскими специалистами. Она пока является единственной монографией, посвященной высокоэффективной очистке воздуха. В ней отражены не только теоретические основы фильтрации, конструкции фильтров и методы их испытания, но дана характеристика аэрозолей, образующихся в атомной промышленности, обобщен опыт эксплуатации вентиляционных систем, включающих высокоэффективные фильтры. Значительная часть материала, вошедшего в книгу, была опубликована в отчетах, проектах и периодических изданиях, часто труднодоступных или вовсе недоступных для советского читателя.

Книга не охватывает всех вопросов, возникающих в связи с проблемой высокоэффективной фильтрации. В ней не описаны конкретные схемы очистки газовых сбросов важнейших радиохимических процессов, характеризующихся образованием аэрозолей с жидкой дисперсной фазой. В главе, посвященной теории фильт-

рации, не рассмотрены достижения последних лет, полученные в СССР.

На русском языке подобных книг нет, поэтому не подлежит сомнению, что она представит интерес для специалистов по очистке воздуха многих отраслей промышленности.

Перевод книги выполнен Мягковым Б. И. (гл. I—IV, VI, VII, X) и Лапенко В. Г. (гл. V, VIII, IX).

ПРЕДИСЛОВИЕ

Очистка воздуха или других газов от нежелательных аэрозольных примесей уже давно стала сложной промышленной проблемой. За последние 15 лет в связи с необходимостью более эффективного улавливания субмикронных частиц требования к очистке возросли. В основном это связано с развитием новых отраслей промышленности, в особенности атомной и биохимической, в которых даже весьма низкие концентрации токсичных аэрозолей представляют серьезную опасность; отчасти это объясняется возникшими требованиями полного удаления частиц из воздуха рабочих помещений или специальных камер и укрытий при производстве фотоматериалов и прецезионных электронно-механических приборов.

Последние достижения промышленной токсикологии в изучении последствий вдыхания воздуха, содержащего очень мелкие частицы, рабочим персоналом, всем населением еще раз подтверждают необходимость решения задач по тонкой очистке воздуха. В связи с этим особое внимание было уделено усовершенствованию всех типов пылеулавливающего оборудования и систем вентиляции на заводах, в больницах и лабораториях. Наибольшее значение приобрели волокнистые фильтры, для которых характерна высокая эффективность улавливания частиц всех размеров, включая субмикронные (часто эти фильтры называют абсолютными). Такие фильтры можно использовать в крупномасштабных установках, имеющих приемлемые величины сопротивлений, пылевых нагрузок и производительности при допустимых габаритах и стоимости.

Фильтрующие материалы, обеспечивающие необходимую эффективность, первоначально были разработаны для снаряжения противогазовых коробок с целью защиты от боевых химических и бактериологических аэрозолей. Службы военно-химической защиты Англии и Соединенных Штатов Америки совместно с промышленными фирмами впервые применили эти материалы в конце второй мировой войны для фильтрации в промышленных целях и руководили разработкой современных материалов и конструкций.

В Англии эти исследования, особенно в отношении разработки более экономичных и безопасных фильтрующих установок, стимулировались Управлением по атомной энергии в Научно-исследовательском центре по атомной энергии (Харуэлл) и в Научно-иссле-

довательском центре по разработке атомного оружия (Олдермастон). В настоящее время там используют невоспламеняющиеся фильтры.

Так как литературных данных, посвященных развитию, конструкциям и эксплуатации таких промышленных фильтрующих систем, крайне мало, а интерес к этой области постоянно возрастает, авторы попытались описать современное состояние технологии высокоэффективной фильтрации и рассмотреть принципы, положенные в основу конструкций и работы систем высокоэффективной фильтрации. Представленные в книге научные основы этой проблемы не претендуют на исчерпывающую полноту, однако они вполне достаточны, чтобы служить руководством для дальнейшего изучения. Инженерные вопросы, относящиеся к конструкциям фильтров и фильтрующим агрегатам, обсуждаются без деталей.

Книга написана сотрудниками Управления по атомной энергии (Олдермастон) и Научно-исследовательского военно-химического центра (Портон), а также специалистами фирмы «Уокес».

Смит С. Е.
Уайт П. А. Ф.

Глава I

ВВЕДЕНИЕ

Многие производственные процессы сопровождаются образованием аэрозолей в виде пылей, возгонов, туманов или дымов; в обычном воздухе содержится значительное количество взвешенных частиц. Наличие всех этих примесей в воздухе при определенных условиях крайне нежелательно. Некоторые примеси обладают высокой токсичностью даже в незначительных концентрациях (особенно это относится к радиоактивным веществам), другие (очень малого размера) вызывают легочные заболевания — пневмокониозы; некоторые примеси крайне нежелательны только при специфических условиях, например табачный дым в системах рециркуляции воздуха подводных лодок. Очень небольшие количества даже весьма мелких частиц снижают качество фотоматериалов в процессе их изготовления. Многие современные технологические процессы требуют очень чистой рабочей атмосферы.

Во всех этих случаях необходимо решать проблему улавливания аэрозольных загрязнений, чтобы воздух был безопасным для дыхания людей и пригодным для проведения специальных технологических операций.

Выбор типа пылеулавливающего оборудования зависит от природы пыли и требуемой эффективности очистки. В промышленности уже давно применяются циклоны, электростатические и тканевые фильтры, эффективность и экономичность которых постоянно улучшаются. Однако обычные промышленные фильтры этих типов не очищают воздух до максимально допустимых концентраций тонкодисперсных частиц. Например, эффективность улавливания частиц размером менее 1 *мкм* никогда не достигает 99,99%.

В последние 10—15 лет бурное развитие получили высокоэффективные фильтры. Впервые они были применены в качестве средств противохимической защиты и в атомной промышленности, так как возникла необходимость высокоэффективной очистки воздуха от радиоактивных частиц. Однако уже сейчас они используются во многих других отраслях промышленности, где возникают аналогичные проблемы, и, несомненно, их применение будет расширяться.

Проблема высокоэффективной фильтрации возникла в конце первой мировой войны, когда появились противогазы, обеспечивающие защиту органов дыхания от ядовитых дымов. Первые противодымные фильтры в противогазовых коробках состояли из слоев волокон целлюлозы, затем для повышения их эффективности слои волокон стали пропитывать сажей и частицами дыма MgO или Al_2O_3.

Работы в этой области особенно интенсивно проводились перед началом второй мировой войны. Первой фильтрующей средой, разработанной в Англии для снаряжения противогазов, была смесь асбестовых волокон и мериносовой шерсти [1]. Научно-исследовательские лаборатории военно-химической защиты Англии и США играли важнейшую роль в совершенствовании высокоэффективных фильтрующих материалов в тех отраслях промышленности, где они использовались для очистки воздуха от токсичных химических веществ и бактерий. В результате появились промышленные фильтры с эффективностью по субмикронным частицам свыше 99,999%. Особенно тщательно надо было очищать воздух от болезнетворных бактериальных организмов, способных размножаться в благоприятной среде.

Материалы на основе смеси хлопка с асбестом и шерсти с частицами твердых смол были разработаны в Англии именно для этих целей, а затем они были применены в атомной промышленности, где аэрозольные примеси в газообразных выбросах необходимо было очищать до 10^{-10} *мг/м*^{3}. Новым толчком к исследованиям послужило строительство атомных электростанций, так как необходимо было снизить стоимость фильтров. Прежде всего получили широкое распространение так называемые бумажные фильтры, впервые разработанные в США. В этих фильтрах площадь фильтрующего материала была очень большой, хотя фильтр занимал небольшой объем. Сохранилась высокая эффективность улавливания тонкодисперсных частиц.

Очень важно установление зависимости эффективности осаждения частиц от их размера. Частицы одних размеров осаждаются значительно лучше, из-за чего величина эффективности, измеренная весовым методом, может быть ошибочной, особенно в том случае, если в аэрозоле содержится значительное количество крупных, обычно легко улавливаемых частиц. Также необходимо, чтобы сопротивление промышленных фильтров было низким независимо от их размеров. Большое внимание было уделено экономичности применения фильтров в крупных установках.

В результате дальнейших исследований в атомной и других отраслях промышленности были созданы целлюлозные и стекловолокнистые фильтрующие бумаги. Улавливание частиц в этих средах происходит в основном не вследствие механического отсеивания, а в результате осаждения частиц на волокнах при прохождении потока аэрозоля. Высокая эффективность улавливания достигается благодаря особой структуре волокнистой системы (размер волокон,

их ориентация, степень уплотнения), обеспечивающей действие таких механизмов осаждения, как инерция, диффузия, зацепление и электростатическое притяжение.

Единственным другим методом, позволяющим улавливать субмикронные частицы с эффективностью того же порядка, является фильтрация в так называемом фильтре с глубоким слоем. Эти фильтры снаряжаются мелким щебнем, песком или коксом, высота слоя достигает 1 *м*, а иногда и больше, размер зерен по высоте изменяется. Эффективность таких установок по аэрозолю с частицами размером 0,5—3 *мкм* составляет 99,9%.

Недавно появились сообщения о том, что эффективность улавливания частиц размером 1 *мкм* обычными рукавными тканевыми фильтрами можно повысить до 99,9% , если на поверхность фильтров предварительно нанести искусственный фильтрующий слой [2]. Однако никаких данных о характере работы этих фильтров пока нет.

Установки с глубоким слоем нашли практическое применение для улавливания туманов серной кислоты, радиоактивных загрязнений и для стерилизации воздуха. Однако в последние годы предпочтение отдается высокоэффективным волокнистым фильтрам, снаряжаемым термостойкой стеклянной бумагой. Они работают при низких скоростях фильтрации, осаждение частиц происходит благодаря совместному действию зацепления, диффузии и инерции.

В настоящей книге рассматриваются именно такие фильтры, их конструкции, монтаж и эксплуатация. Иногда эти фильтры называют абсолютными, хотя незначительный проскок очень мелких аэрозольных частиц почти всегда наблюдается. Степень очистки в таких фильтрах устанавливается в зависимости от концентрации частиц в очищаемом воздухе и величины максимально допустимой концентрации. Требуемую величину эффективности высокоэффективных фильтров можно уменьшить, если часть пыли улавливать в аппаратах предварительной очистки, а также если рассеивать пропущенный через фильтрующие установки воздух или технологические газы в атмосфере выбросными трубами. Такие фильтры особенно необходимы в тех случаях, когда эффективность очистки по наиболее проникающим частицам (размером около 0,1 *мкм*) должна быть не менее 99%.

При установке пылеулавливающих аппаратов предварительной очистки необходимо учитывать возможную степень улавливания ими мелких частиц. Например, в рекомендациях Международного комитета по радиологической защите (МКРЗ) величина максимально допустимой концентрации плутония в воздухе составляет $3 \cdot 10^{-11}$ *г/м*^{3}; если принять, что концентрация на выбросе за счет рассеивания дымовой трубой будет снижена в 10 раз, то требуемая эффективность должна быть 99,995% при условии, если начальная концентрация равна $6 \cdot 10^{-6}$ *г/м*^{3}. Крупные частицы будут уловлены циклоном на 90%, однако и после циклона концентрация пыли со-

ставит $6 \cdot 10^{-5}$ *г/м*³, причем останутся самые мелкие частицы, которые потребуется уловить фильтром с эффективностью 99,95%. В таких пределах должны находиться значения эффективностей высокоэффективных фильтров. В большинстве случаев «абсолютные» фильтры отвечают этим требованиям, а обычные промышленные пылеулавливающие аппараты даже хорошей конструкции не решают таких задач.

Необходимо отметить, что высокоэффективные фильтры из-за их низкой пылеемкости применимы только в случаях, когда входные концентрации менее 1 *мг/м*³, при более высоких концентрациях их необходимо часто заменять (не реже одного раза в месяц при концентрации 1 *мг/м*³).

Высокоэффективные фильтры нецелесообразно устанавливать даже при наличии тонкодисперсных аэрозолей, если требуемая эффективность очистки не должна превышать 90% (для этих целей можно использовать более дешевые установки). Поэтому их применение ограничивается условиями, при которых максимально допустимая концентрация частиц в воздухе после фильтров должна быть менее 0,2 *мг/м*³, если только такие концентрации допустимы. (Следует всегда помнить о коэффициенте надежности: максимально допустимая концентрация не должна достигаться ни при каких условиях.)

В табл. 1.1 приведены значения максимально допустимых концентраций наиболее токсичных промышленных пылей и радиоактивных веществ; вдыхание воздуха с такими концентрациями допустимо в рабочих помещениях при 40-часовой рабочей неделе.

Таблица 1.1

Максимально допустимые концентрации промышленных пылей и радиоактивных веществ

Промышленная пыль или радиоактивное вещество	Концентрация, *мг/м*³	Промышленная пыль или радиоактивное вещество	Концентрация, *мг/м*³
Окислы железа	30	Ртуть	0,1
Окись цинка	15	Кадмий	0,1
Окись магния	15	Хромовая кислота	0,1
Перманганат	6	Паратион	0,1
Акролеин	2,3	Уран (естественный)	0,09
Динитробензол	1,5	Осмий	0,01
Дифенилхлорид	1,0	Теллур	$5 \cdot 10^{-3}$
Пыль фторидов	1,0	Бериллий	$2 \cdot 10^{-3}$
Иод	1,0	Уран-235	$1,7 \cdot 10^{-3}$
Перекись бария	0,5	Углерод-14	$2 \cdot 10^{-3}$
Торий	0,5	Натрий-24	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Пентахлорнафталин	0,5	Фосфор-32	$3,4 \cdot 10^{-10}$
Мышьяк	0,15	Радий-226	$8 \cdot 10^{-9}$
Свинец	0,15	Стронций-90	$1,2 \cdot 10^{-9}$
Окись кремния	0,1*	Иод-131	$4,7 \cdot 10^{-11}$

* Или $2 \cdot 10^{6}$ частиц размером менее 5 *мкм* в 1 *л* воздуха.

Из рассмотрения табл. 1.1 можно сделать вывод, что высокоэффективные фильтры следует применять для очистки от наиболее вредных промышленных пылей и от большинства радиоактивных веществ, а также в тех случаях, когда необходим особенно чистый атмосферный воздух в качестве специальной рабочей среды.

Вместе с тем единственным средством улавливания любых аэрозольных частиц размером около 1 *мкм*, концентрация которых не должна превышать 0,2 *мг/м*^{3}, по-видимому, являются высокоэффективные фильтры. Они удовлетворяют всем требованиям без разбавления и рассеивания с помощью трубы. Разбавление позволяет снизить концентрацию нежелательных веществ только в воздухе, выбрасываемом из помещений, но оно недопустимо в тех случаях, когда атмосферный воздух должен быть чистым по технологическим причинам или когда воздух, выводимый из процесса, участвует в рециркуляции.

Высокоэффективные фильтры можно использовать в комбинации с такими пылеулавливающими промышленными аппаратами, как электростатические и тканевые фильтры или грубоволокнистые фильтры предварительной очистки (предфильтры), для снижения входной концентрации перед фильтрами тонкой очистки. Обычно срок службы последних при этом значительно увеличивается. Очень важно, что для таких фильтров не существует нижнего предела концентрации пыли, которого нельзя было бы достичь.

Рециркуляция воздуха, необходимая в некоторых случаях, например в подводных лодках или в системах кондиционирования воздуха, проводимая с целью снижения расходов на отопление, может также потребовать применения высокоэффективных фильтров наряду с другими методами очистки. Фильтры тонкой очистки очищают воздух от ядовитых веществ до такого уровня, что он снова может быть использован. Обычные же газоочистные сооружения снижают концентрацию ядовитых веществ только до таких величин, что этот воздух разрешается выбрасывать в атмосферу.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Ниже приводится краткий обзор основных производств, в которых высокоэффективная фильтрация применяется или может найти успешное применение в будущем.

Работа с радиоактивными веществами

При работе с радиоактивными материалами возможно возникновение активности в виде аэрозолей. Поэтому необходимо предусматривать надежные методы их удаления, чтобы не допустить опасного воздействия вдыхаемых аэрозолей на здоровье людей, а также исключить явления повторного загрязнения, повышения фона общего облучения при недостаточном экранировании или даже при создании условий ядерной критичности. Иногда бывает экономически выгодно использовать уловленные материалы.

При работе как в открытых рабочих помещениях, так и в огражденных герметических зонах необходима правильная организация вентиляции, а также очистка аспирационного воздуха; в вытяжных шкафах следует создавать достаточное разрежение во избежание выноса частиц из них, а отсасываемый воздух перед выбросом в атмосферу надо очищать; воздух или инертные газы, циркулирующие в перчаточных боксах или отсасываемые из них, также надо подвергать очистке.

Газы, используемые в системах охлаждения реакторов, а также сдувки от химических процессов, необходимо очищать от аэрозольных частиц в соответствии с санитарными требованиями, чтобы не загрязнять атмосферу, если их выбрасывают, или чтобы обеспечить ядерную безопасность в случае систем рециркуляции.

При сбросе воздуха в атмосферу содержание радиоактивных частиц должно быть снижено до предельно допустимых уровней, установленных МКРЗ. Так как эти нормы очень низки, то только высокоэффективные фильтры обеспечивают необходимую степень очистки от большинства аэрозолей. Степень очистки рассчитывается исходя из величин максимально возможных выбросов в аварийных условиях и величины остаточной активности, допускаемой органами здравоохранения для обслуживающего персонала и для населения, живущего на прилежащей к заводу территории.

Радиоактивные аэрозоли образуются в большинстве технологических операций на заводах по переработке руд и производству металлов (урана, тория и т. д.), на радиохимических разделительных заводах, предприятиях по изготовлению и переработке тепловыделяющих элементов. Они содержатся в воздухе и газах, используемых для охлаждения и вентилирования ядерных реакторов.

Биохимические процессы

При производстве многих лечебных препаратов, ферментов и вообще в биохимической технологии возникает много проблем, решение которых зависит от высокоэффективного улавливания очень мелких аэрозольных частиц. Производства, которые основаны на активной деятельности бактерий, спор и вирусов, включают в себя процессы брожения для получения алкогольных напитков, а также некоторых растворителей (например, этилового и бутилового спиртов, химикалиев, таких, как итаконовая кислота и большое количество антибиотиков, широко используемых в настоящее время) и процессы получения витаминов и вакцин, антитоксинов и антисеринов и еще многих других микрохимикалиев сложной молекулярной структуры. Некоторые технологические операции пищевой промышленности (выделение инсулина и других гормонов, обработка натуральных волокон и зерновых продуктов) могут быть значительно интенсифицированы применением бактерий.

Необходимость обеспечения стерильности, т. е. полного удаления жизнедеятельных организмов, является постоянной проблемой

для большинства этих процессов. Воздух, используемый для аэрации аэробных ферментов или для обработки в режиме псевдоожижения фармацевтических препаратов, должен быть настолько стерильным, чтобы ни один посторонний организм не мог попасть в емкость для выращивания бактерий, или настолько чистым, чтобы не допустить забивания пылью пористых воздухораспределителей (керамических фильтров) при обработке воздухом воды. Аспирационный воздух после использования в процессах, в которых выращиваются патогенные бактерии, во избежание поражения обслуживающего персонала и окружающего населения должен быть тщательно очищен. В большинстве технологических процессов обработки фармацевтических препаратов (их выделение, очистка и упаковка) в рабочих помещениях необходимо поддерживать стерильные условия, чтобы посторонние микроорганизмы не могли служить причиной порчи или снижения качества продукции.

Очень высокую степень стерильности необходимо поддерживать в исследовательских лабораториях, особенно в тех, где работают с патогенными бактериями. В обычных условиях биохимических производств стерильность поддерживается на среднем уровне, однако необходимо выполнять весьма строгие требования, если в помещениях имеются перчаточные боксы или камеры для работы с ферментами или с патогенными бактериями для исследований на животных.

Так же как и с другими токсичными или вообще нежелательными аэрозолями, разбавление свежим воздухом может в некоторых случаях позволить решить проблему снижения уровня загрязнения организмами, например в помещениях для работы с животными [3]. Однако потенциальная опасность таких загрязнений для окружающего населения в большинстве случаев, когда имеют дело с патогенными организмами, не позволяет ограничиться только вентиляцией. Если патогенных бактерий нет, основное внимание должно быть уделено снижению содержания жизнедеятельных организмов до такого уровня, при котором во избежание влияния этих организмов на качество продукции экономически выгодно применить стерилизацию.

Стерилизовать воздух можно путем его нагревания, ультрафиолетового облучения или использования бактерицидных туманов или паров. Бактериальные частицы могут быть удалены из воздуха в электростатических фильтрах или в скрубберах, однако из-за их малого размера (в среднем 1,5 *мкм*) и низких предельно допустимых концентраций (часто бывает необходимо улавливать их полностью вследствие их плодовитости) наиболее удовлетворительные результаты получают при проведении высокоэффективной фильтрации и не только потому, что при этом улавливаются мелкие частицы. Высокоэффективные фильтры требуют минимального ухода и обеспечивают необходимую степень очистки даже в аварийных случаях.

Медицина

Аналогичные проблемы стерилизации воздуха возникают в больницах. В операционных необходима атмосфера, свободная от бактерий: воздух, отсасываемый из инфекционных боксов или палат, желательно обрабатывать. Для последних особенно тщательно следует проектировать системы вентиляции, чтобы аспирируемый воздух не мог проникнуть наружу без стерилизации.

При соответствующей фильтрации приточного воздуха и высокоэффективной фильтрации в вытяжной системе могут сохраняться удовлетворительные условия в течение многих лет, так что системы фильтрации окажутся экономически выгодными, особенно если применение стерилизации позволит осуществить полную рециркуляцию воздуха.

В последнее время интерес к применению высокоэффективной фильтрации в больницах значительно возрос, хотя относительно высокие капитальные затраты на оборудование такой фильтрации несколько сдерживают ее широкое использование.

Защита органов дыхания

Наряду с проблемой очистки воздуха от бактерий в инфекционных палатах больниц существует проблема подачи обеспыленного воздуха в палаты, где лечат людей с болезнями органов дыхания. Течение этих болезней часто осложняется вследствие сильного загрязнения воздуха. На рис. 1.1 показана зависимость смертельных случаев от концентрации пыли и SO_2 во время смога в Лондоне в 1952 г.

Для этих целей используют «абсолютные» фильтры, как, например, в больнице Сант Карлос в Лондоне, где в условиях тумана «нормальное» содержание аэрозольных примесей достигает 3,6 *мг/м*^{3} [4].

Уже давно хорошо известно, что некоторые минеральные пыли вызывают легочные заболевания. Наиболее распространенными видами этих заболеваний являются силикоз и асбестоз. Различные минеральные пыли, стеклянное волокно, антрацит могут вызывать и другие формы легочных заболеваний. То же относится к бериллиевым аэрозолям. Такие пыли вызывают характерную фиброзность легочных тканей, если частицы пыли достаточно малы, чтобы проникнуть через носоглотку, трахею и бронхи в альвеолы. Обычно проникают частицы размером 5 *мкм* и меньше. Допустимое число частиц в 1 *см*^{3}, вызывающих пневмокониозы, обычно составляет $1{,}8 \cdot 10^2$, что эквивалентно весовой концентрации 0,1 *мг/м*^{3} при средневесовом размере частиц около 3 *мкм*. Однако, по-видимому, эти пределы приняты исходя из практических возможностей в настоящее время; желательно иметь более низкие концентрации [5].

При переработке асбеста образуются аэрозоли из волокон диаметром до 0,02 *мкм* (хризотиловый асбест); очистка воздуха как в помещениях, так и при выбросе в атмосферу представляет сложную проблему. Пыль, отсасываемая из укрытий, подвергается очистке в обычных рукавных фильтрах, причем эффективность осаждения очень высока, так как уловленные волокна асбеста образуют на внутренней поверхности рукавов автофильтрующий слой. С учетом рассеивания в атмосфере выбросными трубами этот способ очистки в настоящее время удовлетворяет необходимым требованиям, однако

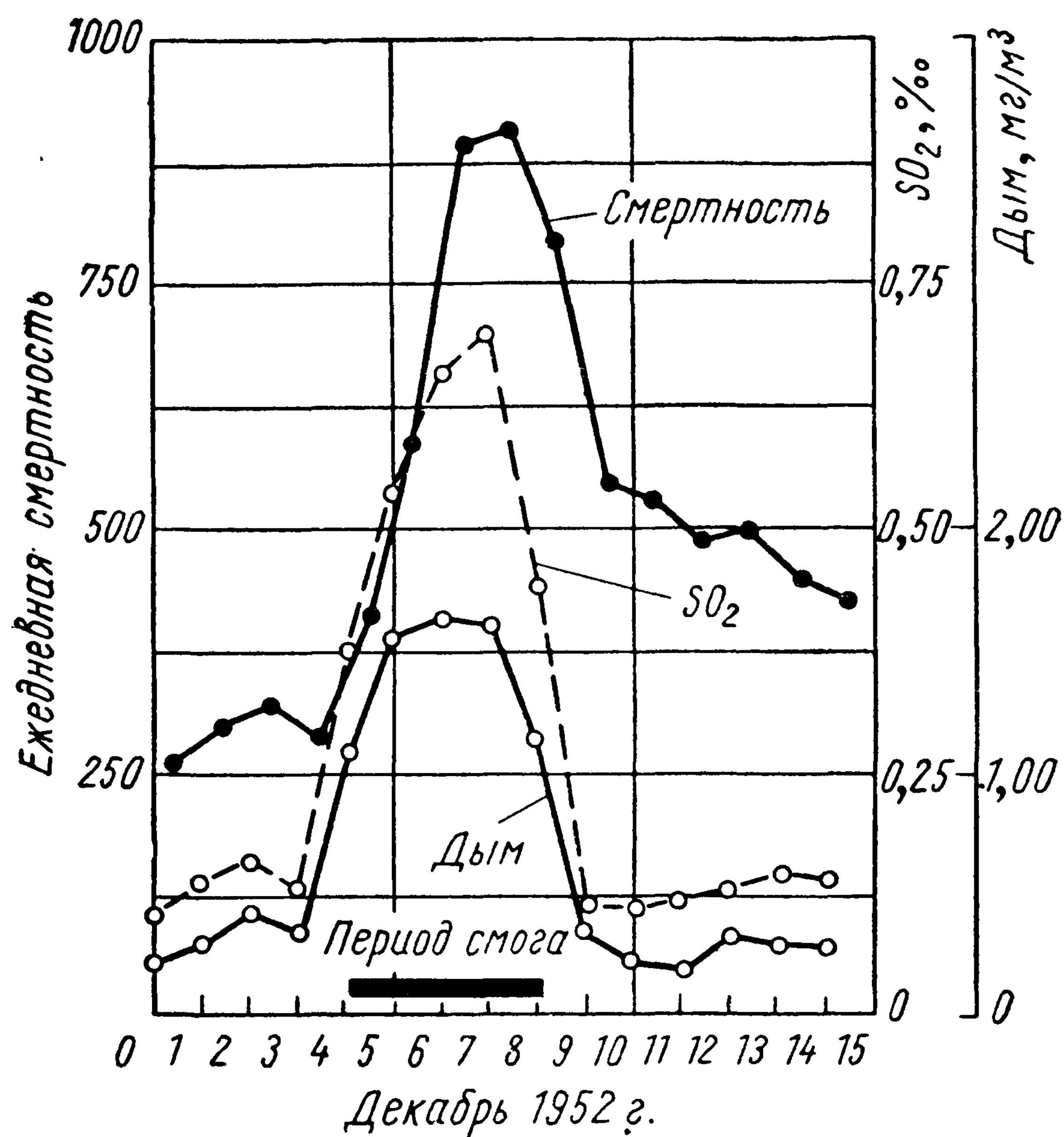


Рис. 1.1. Число смертных случаев в зависимости от загрязнения воздуха.

очистка только в рукавных фильтрах не позволяет применять в рабочих помещениях рециркуляцию воздуха и, кроме того, для эффективной вентиляции требуется очень много воздуха, а это удорожает отопление.

Для разрешения этой проблемы сейчас начинают устанавливать высокоэффективные фильтры, с большим вниманием подходят к проектированию систем местной и общей вентиляции с целью поддержания концентраций в рабочих помещениях в пределах 100—1000 частиц в 1 *см*³ (75% этих частиц имеют размеры 0,5—2 *мкм*). Одновременно ведутся опыты с установкой абсолютных фильтров, обеспечивающих очистку и рециркуляцию воздуха внутри рабочих помещений. Ожидают, что этим способом можно уменьшить концентрацию пыли и снизить расходы вентиляционного воздуха [6].

Улавливание пылей

Проблема ослабления или полной ликвидации воздействия промышленных токсичных пылей на обслуживающий персонал и население — большая и сложная [7—9]. Однако в ее решении достигнуты большие успехи, особенно за последнюю четверть века.

Хорошо известны токсичные пыли соединений свинца, хрома, мышьяка и ртути; величины предельно допустимых концентраций этих пылей в рабочих помещениях и в выбрасываемых газах по мере совершенствования технологии улавливания и контроля постоянно, хотя и медленно, уменьшаются.

В Англии величины предельно допустимых концентраций, согласованные с соответствующими инспекторами предприятий и авторитетными специалистами Министерства внутренних дел, рассчитаны в зависимости от многих факторов: производительности предприятий, высоты дымовых труб, природных условий окружающих районов (в основном они соответствуют данным табл. 1.1). Однако обычное пылеулавливающее оборудование уже не удовлетворяет всем требованиям очистки воздуха. Необходимо проведение исследований по значительному усовершенствованию пылеуловителей (особенно скрубберов Вентури), их экономичности. Возможности использования высокоэффективных фильтров для улавливания обычных пылей пока еще серьезно не изучены. Последние успехи в этой области еще недостаточно оценены в промышленности, особенно возможность снижения объема вентиляционного воздуха путем рециркуляции.

Высокоэффективные фильтры начинают применять в металлургической и химической промышленности, так как предельно допустимые концентрации многих новых материалов (например, бериллия, кадмия, теллура) значительно более низкие, чем «классических» пылей, и никакое старое оборудование не обеспечивает требований очистки.

Кроме возгонов металлов в промышленности возрастает количество выбросов, содержащих весьма вредные продукты, например инсектициды и наркотики. Примером может служить паратион, который в два раза токсичнее свинца. Одним из способов защиты от таких веществ является применение респираторов, хотя высокоэффективная фильтрация в этих случаях принесла бы большую пользу.

Проблема ликвидации пахучих газовых сбросов, имеющихся во многих промышленных процессах, требует дальнейшего изучения. Источниками запаха могут быть пары, туманы и твердые частицы. Удаление их весьма сложно, тем более что органы обоняния способны чувствовать такую низкую концентрацию, как 10^{-12} *г* в 50 *см*^{3} воздуха [9]. В тех случаях, когда запах вызван твердыми частицами, вполне возможно применение высокоэффективной фильтрации.

Высокоэффективная фильтрация применяется не только для улавливания вредных или опасных загрязнений, она необходима также в некоторых процессах, которые могут осуществляться только в свободной от пыли атмосфере. Число таких процессов непрерывно

возрастает; в некоторых случаях лишь с использованием высокоэффективной фильтрации можно обеспечить выпуск изделий с допустимыми нормами брака.

Непрерывно растет потребность в чистом воздухе в полупроводниковой промышленности, в производстве прецизионных конденсаторов высшего качества, транзисторов, микросхем, трубок или пушек инфракрасного излучения, телевизионных трубок; в производстве печатных схем, получаемых напылением, а также при испытаниях как исходных материалов, так и готовых узлов и собранных приборов. Это относится в первую очередь к производству электротехнических устройств, например систем контроля и управления ракет, гироскопов, аппаратов для скоростной съемки и сервомеханизмов. Для работы таких аппаратов необходима атмосфера, совершенно свободная от пыли. Производство прецизионных инструментов, часов, миниатюрных шарикоподшипников, магнитной ленты, миниатюрных электронных ламп также требует обеспыленной атмосферы. При работах с оптическими стеклами и различными оптико-механическими устройствами даже при прецизионной механической обработке и шлифовке металлов часто приходится прибегать к сложным и дорогим установкам для очистки воздуха. На всех стадиях производства фотоматериалов, начиная с приготовления эмульсий, необходимо полностью удалять из воздуха все частицы размером более 1,5 *мкм*. В настоящее время выполнение этих требований особенно важно в связи с использованием малоформатных пленок, так как ничтожные дефекты на поверхности усиливаются соответственно степени увеличения.

Для большинства таких технологических процессов еще не установлены уровни предельно допустимых концентраций пыли и не найдены достаточно быстрые, простые и дешевые способы определения этих концентраций. Обычно эффективные способы очистки воздуха отрабатываются практически. Опыты проводят до тех пор, пока не получают удовлетворительные результаты. Очевидно, только применение высокоэффективной фильтрации может удовлетворить необходимым требованиям.

Очистка воздуха от табачного дыма

С точки зрения улучшения гигиены особого внимания заслуживает очистка воздуха от табачного дыма. Эта проблема довольно сложная, так как частицы табачного дыма имеют очень малые размеры (0,01—1 *мкм*), и для того чтобы достичь только удовлетворительных результатов, необходимо применять специально разработанные волокнистые фильтры. Проблема приобретает особое значение в тех случаях, когда желательно осуществить рециркуляцию воздуха, чтобы сократить расходы на отопление, неизбежно высокие при обычной вентиляции.

На рис. 1.2 показаны «абсолютные» фильтры, используемые для очистки воздуха в салонах авианосца. Воздух забирается в местах

наибольшего скопления дыма, подается в «абсолютные» фильтры. Затем очищенный воздух снова поступает в салон. Аналогичная проблема существует на подводных лодках, где кондиционирование всех параметров воздуха имеет еще большее значение. На самолетах основная задача — уменьшение до минимума габаритов и веса аппаратуры при сохранении требуемой эффективности очистки табачного

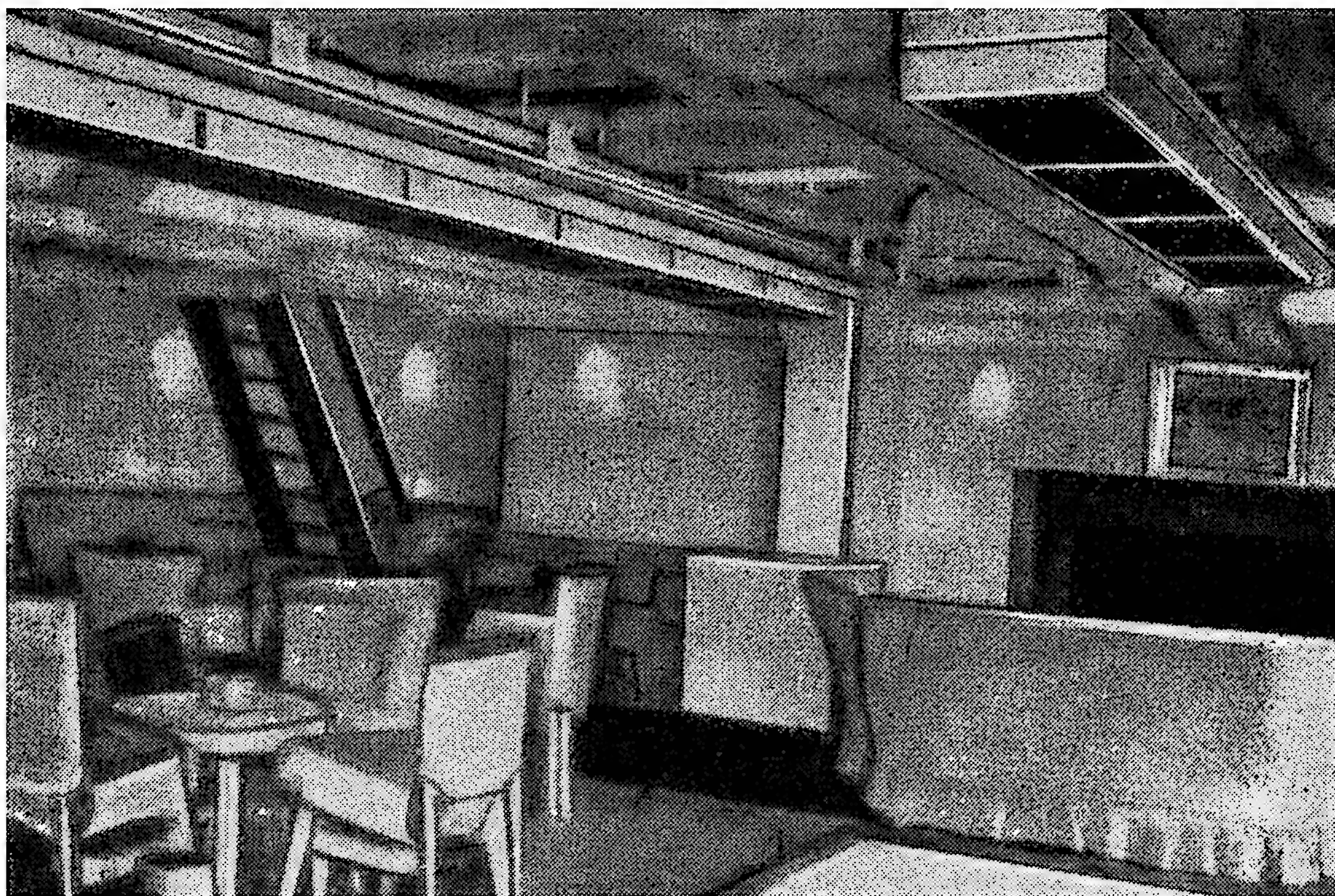


Рис. 1.2. Салон для курения на авианосце, оборудованный системой рециркуляции воздуха с его очисткой от табачного дыма в «абсолютных» фильтрах.

дыма примерно 80—90%. Фильтрующие установки часто комбинируют с аппаратами для устранения запаха, которые обычно состоят из слоя активированного угля.

В настоящее время проблема очистки от табачного дыма разрешена только для специальных применений. Она заслуживает дальнейшей разработки в целях решения общей проблемы кондиционирования воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sedd J. et al. Chem. Ind., 781 (1938).
2. Squires B. Chem. Proc. Engng, 156 (1962).
3. Darlow H. Lab. Anim. Ctr. Coll. Papers, 10, 65 (1961).
4. Keeping J. (частное сообщение).
5. Drinker P., Hatch T. Industrial Dusts. N. Y. McGraw Hill, 1954.
6. Holmes S. (частное сообщение).
7. Stern A. (Ed.). Air Pollution. N. Y., Academic Press, 1962.
8. Magill P. et al. Air Pollution Handbook. N. Y., McGraw-Hill, 1956.
9. Thring M. Air Pollution. London, Butterworths, 1957.

Глава II

ПРИРОДА АЭРОЗОЛЕЙ

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЕЙ

Определения

Термин «аэрозоль» впервые использовал Гиббс [1], чтобы охватить все разнообразие аэродисперсных систем, включая пыли, туман, возгоны и дым.

Пылями называют аэрозоли, возникающие при диспергировании материалов в таких процессах, как дробление, взрыв, измельчение или механическая обработка с одновременным или последующим переходом частиц во взвешенное состояние. Обычно размеры частиц в пылях больше, чем в дымах, возгонах и туманах.

Возгоны, образующиеся в результате сублимации, горения и конденсации, как правило, содержат частицы размером меньше 1 *мкм*. Дым, отличительной характеристикой которого является наличие значительной оптической плотности, образуется в таких же процессах, что и возгоны, однако размер частиц в них может быть еще меньше. Туманы состоят из жидких частиц, образующихся при конденсации паров на подходящих ядрах или при распылении жидкостей.

Размеры частиц в значительной степени зависят от условий образования.

Размеры частиц

Использование фильтрации наиболее целесообразно для улавливания возгонов и дымов. «Абсолютные» фильтры применяются в тех случаях, когда другое оборудование почти неприменимо.

Таким образом, вопрос о размерах частиц имеет существенное значение и он подробно рассмотрен в этой главе по отношению к различным типам аэрозолей.

Наиболее часто используемой единицей для измерения частиц является микрометр (*мкм*), равный $\frac{1}{1000}$ *мм*. Размером частицы обычно считается величина среднего или эквивалентного диаметра, хотя иногда размер частиц определяют величиной радиуса.

Распределение частиц по размерам

Результаты анализов размеров частиц обычно представляются в виде интегральных (кумулятивных) кривых весового распределения фракций, при построении которых доля частиц меньше опреде-

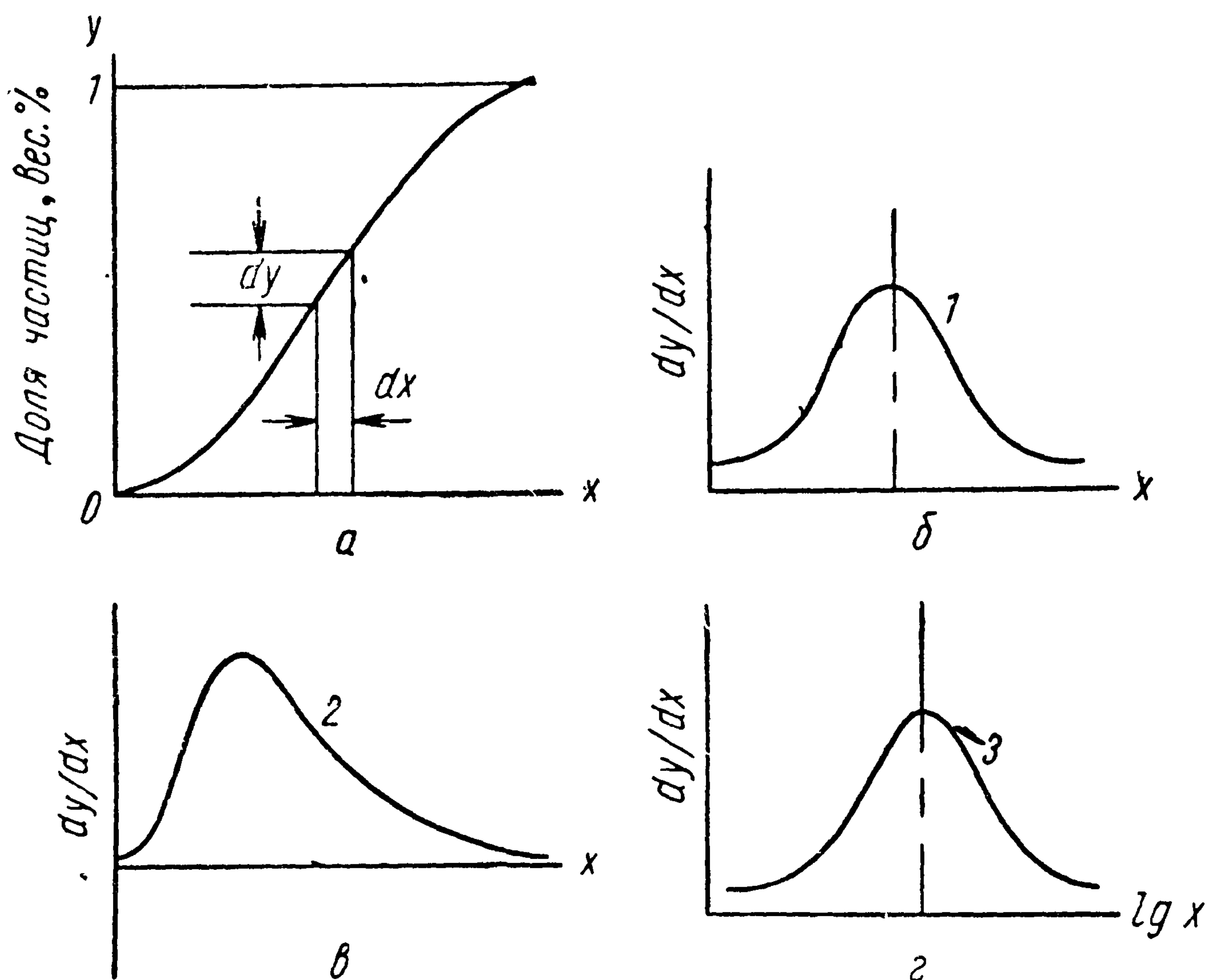


Рис. 2.1. Типы кривых распределения частиц по размерам:

1 — нормальное вероятностное распределение; 2 — асимметричное вероятностное распределение; 3 — логарифмическое нормальное распределение.

ленного размера откладывается против величины частиц. Эти кривые растут от нуля до единицы во всей области представленных размеров частиц (рис. 2.1, *а*).

Однако такие кривые не обладают большой наглядностью распределения, поэтому строят дифференциальные кривые распределения частиц по размерам, которые можно получать дифференцированием интегральной кривой (рис. 2,1 *б*). Некоторые из этих кривых могут хорошо описываться известными функциями. Если данные включают в себя широкую область размеров, то часто лучше откладывать dy/dx против логарифма размера. Обычно нормальное вероятностное уравнение применяется только к тем распределениям, которые симметричны относительно вертикальной оси (см. рис. 2.1, *б*).

Однако возникает много случаев асимметрических или «скошенных» распределений, в которых не проявляется нормальная вероятность. К счастью, в большинстве примеров симметрия может быть восстановлена, если на оси абсцисс отложить логарифмы размеров. Тогда говорят, что кривая распределения является логарифмически нормальной (рис. 2.1, *в* и *г*). Уравнение нормально вероятностной кривой имеет вид

$$y = \frac{1}{\sigma (2\pi)^{1/2}} \exp \left[-\frac{(x - x_{ср})^2}{2\sigma^2} \right], \qquad (2.1)$$

где y — кумулятивный процент (доля частиц, меньших определенного размера); x — линейный размер частицы; $x_{ср}$ — среднеарифметическое значение наблюдений;

$$\sigma = \left(\frac{\sum [n (x - x_{ср})^2]}{n} \right)^{1/2}$$

стандартное отклонение (здесь n — общее число наблюдений).

Хозен [2] разработал специальную сетку, которая позволяет получить сразу прямую линию для дифференциальной кривой распределения. Эта сетка состоит из системы координат с вероятностной шкалой, т. е. в основе шкалы лежит вероятностный интеграл. На этой шкале откладывается суммарный процент частиц, больших или меньших определенного размера. По оси абсцисс откладываются измеренные диаметры частиц в арифметическом или логарифмическом масштабе.

Если данные по распределению, соответствующие уравнению (2.1), откладываются в арифметически вероятностной сетке, то получается прямая линия. Точно так же, если кривая является асимметрической и описывается уравнением (2.2), то прямая линия получается в вероятностно логарифмической сетке. Эти оба случая обычно относятся к нормальному или логарифмически нормальному распределению.

Уравнение (2.2) вытекает из уравнения (2.1) при подстановке $\ln \sigma$ вместо σ и $\ln x$ вместо x:

$$y = \frac{1}{\ln \sigma_g (2\pi)^{1/2}} \exp - \frac{(\ln x - \ln x_g)^2}{2 \ln^2 \sigma_g}, \qquad (2.2)$$

где

$$\ln \sigma_g = \frac{n (\ln x - \ln x_g)^2}{n};$$

x_g — среднегеометрическое значение линейного размера;
σ_g — геометрическое стандартное отклонение.

Уравнения (2.1) и (2.2) справедливы для области от $-\infty$ до $+\infty$, т. е. распределения должны быть асимптотическими в обоих пределах; однако практически измеренные частицы имеют наименьший и наибольший размеры, поэтому распределения не являются асимптотическими и точки на вероятностной сетке часто отходят от пря-

мой на ее краях. Это не существенно, если площадь, расположенная от крайних значений до бесконечности, незначительна по сравнению с площадью под кривой распределения в области измеренных размеров частиц.

Использование вероятностных сеток весьма удобно, когда необходимы среднеарифметические или среднегеометрические значения, так как эти значения могут быть взяты непосредственно с графика для ординаты 50% соответственно на арифметической или вероятностно логарифмической сетках.

Эффективность

Эффективность фильтра обычно выражается процентным отношением количества уловленного материала к количеству материала, поступившего на фильтр из воздушного потока, причем количество материала может выражаться числом частиц или весом.

Очень важно отметить различие между этими двумя способами выражения количества материала, так как более крупные частицы не только лучше улавливаются, но и составляют подавляющую весовую часть, и они практически определяют значение весовой эффективности. В качестве примера рассмотрим объем аэрозоля, содержащий 100 частиц диаметром 1 *мкм* и 100 частиц диаметром 100 *мкм*. Эффективность осаждения пусть будет составлять для первых частиц 90% и для вторых 99%. Тогда общая эффективность улавливания, рассчитанная на основе счетных концентраций, составит 94,5% (уловлено всего 189 частиц из 200). Однако, если частица размером 1 *мкм* имеет единицу массы, а размером 100 *мкм* — 10^6 единиц массы, то эффективность улавливания на основе весовых концентраций составит

$$\frac{99 + 99 \cdot 10^6}{100 + 100 \cdot 10^6} = 99\%.$$

Следовательно, любое выражение эффективности пылеулавливающего аппарата без точного указания размеров улавливаемых частиц не имеет смысла. Нередко новые пылеуловители рекламируются как аппараты, обеспечивающие эффективность осаждения частиц размером менее 1 *мкм* на 99,9%. На самом деле их эффективность по осаждению частиц со среднемассовым размером 1 *мкм* составляет всего 50%. Вместе с тем не следует предъявлять требования высокой эффективности для улавливания мелких частиц, если необходимо только снизить вес пыли, состоящей в основном из крупных частиц.

Природа пыли

Необходимость осаждения частиц может вызываться различными причинами. В одних случаях желательно удалить полностью всю пыль, в других — уловить частицы только в определенной об-

ласти размеров или только частицы определенного вида. Поэтому при решении любой проблемы пылеулавливания следует тщательно исследовать свойства пыли, чтобы в последующем иметь дело с той ее частью, которая представляет интерес для улавливания. Так, например, радиоактивные пыли, образующиеся в ряде соответствующих производств, содержат, вероятно, значительно большую долю инертных материалов, чем активных, и если в результате какого-либо явления радиоактивные частицы будут укрупнены по сравнению с инертной частью, то решение задачи высокоэффективного улавливания должно определяться этим фактом. В случае удаления бактерий размер улавливаемых частиц известен, и это следует учитывать при проектировании аппарата для этих целей.

К сожалению, в настоящее время имеется слишком мало сведений как о природе и размерах обрабатываемых пылей, так и о поведении фильтров и других пылеулавливающих устройств в зависимости от размеров частиц, их плотности и формы. Очевидно, по мере накопления таких сведений будут найдены более экономичные решения многих проблем фильтрации.

Коагуляция

Коагуляция — специфическое свойство тонкодисперсных аэрозолей; с одной стороны, она затрудняет проведение экспериментов и определение точных характеристик процесса фильтрации, а с другой, может способствовать улучшению осаждения. Мелкие аэрозольные частицы под действием силы тяжести, турбулентного движения и особенно броуновского движения, часто сталкиваясь друг с другом, образуют агрегаты. Жидкие частицы обычно сливаются в единичные капли.

Это явление детально описано во многих монографиях [3], в настоящей книге оно более подробно рассмотрено в гл. III. Здесь же мы только отметим, что скорость коагуляции для монодисперсных аэрозолей со сферическими частицами в спокойном газе определяется по уравнению

$$-\frac{dc}{dt} = (4RT/3\mu N)\,(1 + K_{me}\,\lambda_m/D_p)\,C^2, \qquad (2.3)$$

где dc/dt — скорость коагуляции, $\frac{\text{число частиц}}{\text{(единица объема}\cdot\text{единица времени)}}$; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; λ_m — длина среднего свободного пути молекул (для воздуха 0,1 *мкм*); K_{me} — поправочный коэффициент (для воздуха 1,72); μ — вязкость газа; N — число Авогадро; D_p — диаметр частиц; C — концентрация, $\frac{\text{число частиц}}{\text{единица объема}}$.

Для мелких частиц ($K\lambda/D_p \gg 1$) скорость коагуляции увеличивается с уменьшением размеров частиц и с ростом концентрации.

Таким образом, явление коагуляции имеет существенно большее значение для высоко концентрированных возгонных аэрозолей, чем для обычной пыли [4].

Агрегаты, образующиеся из тонких частиц за счет коагуляции, по своим динамическим свойствам равноценны крупным частицам, поэтому намного легче удаляются из воздуха и в то же время менее опасны при вдыхании, хотя их плотность значительно меньше плотности сплошных частиц. Однако для того, чтобы коагуляция протекала с ощутимой скоростью, необходима слишком высокая концентрация. Вследствие этого коагуляция редко используется для улучшения высокоэффективной фильтрации.

Коагуляция особенно быстро протекает в полидисперсных аэрозолях и при интенсивном турбулентном движении [5]. Она также ускоряется в присутствии конденсирующихся паров. Пары конденсируются на частицах (особенно гигроскопических веществ) до тех пор, пока давление пара над частицей не становится равным давлению паров в воздухе, хотя вообще для получения этого эффекта необходимы условия насыщения.

Коагуляция мелких частиц (размером менее 10 *мкм* и при концентрации свыше 2 *г/м*^{3}) может быть осуществлена за счет использования ультразвуковой энергии. Если концентрация аэрозолей меньше, можно усилить эффект введением инертного аэрозоля или паров воды.

Как теоретические, так и практические вопросы использования коагуляции для кондиционирования промышленных аэрозолей перед их фильтрацией требуют дальнейшего изучения. Такие исследования позволят увеличить срок службы фильтров и уменьшить их стоимость.

АТМОСФЕРНЫЕ И ПРОМЫШЛЕННЫЕ АЭРОЗОЛИ

Величины концентраций аэрозольных частиц в атмосферном воздухе изменяются в широких пределах и, безусловно, зависят от характера района. Максимальная концентрация в городском воздухе почти в тысячу раз больше, чем минимальная концентрация в сельских районах. Однако средняя концентрация в городе только в четыре раза превышает среднюю концентрацию в негородских районах (рис. 2.2, табл. 2.1).

Следует отличать так называемый нормальный воздух, содержащий естественно образующиеся частицы, от загрязненного, содержащего, кроме того, продукты жизнедеятельности.

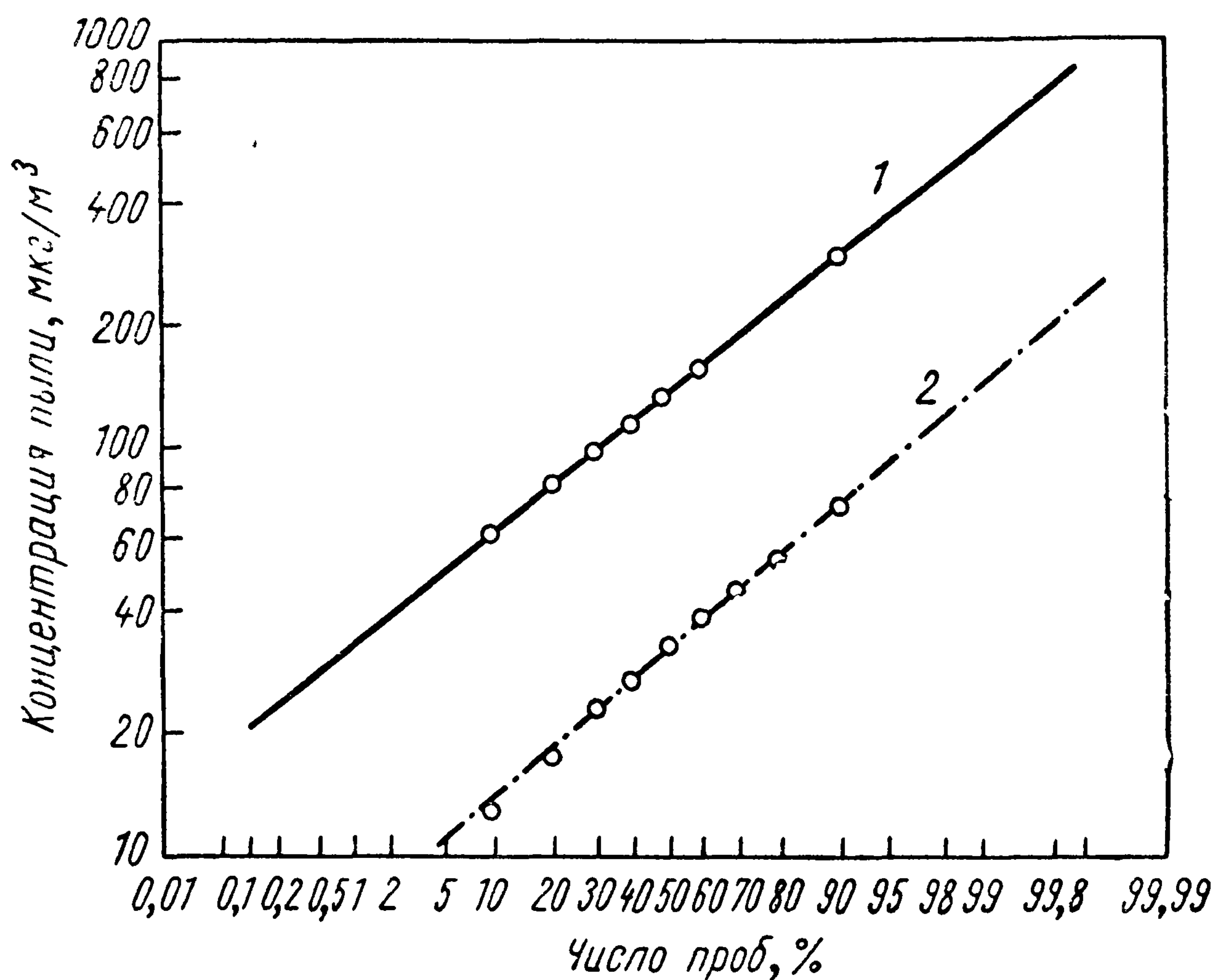
Естественно образующиеся частицы включают в себя такие вещества, как морская соль, дым

Таблица 2.1

Типичные концентрации пыли для различных районов США [6]

Район	Концентрация, *мг/м*^{3}
Сельский (и пригороды)	0,05—0,5
Городской	0,1—1,0
Промышленный	0,2—5,0
Производственные помещения	5—10,0

лесных пожаров, минеральные пыли вулканического происхождения или продукты ветровой эрозии, органические вещества от разрушения растительности, живые организмы (например, бактерии, споры, цветочная пыльца). Величины концентраций в нормальном атмосферном воздухе изменяются также в широких пределах. Например, установлено [7], что концентрация солей на берегу может меняться от 0,004 до 22 *мг/м*³. Средняя концентрация солей для городских районов в США составляет 0,039 *мг/м*³.



Ри. 2.2. Распределение обычных аэрозольных загрязнений в атмосфере городов и вне их по 1000 районам США за 1953—1957 гг.:

1 — в городах; *2* — в сельской местности.

В загрязненном воздухе содержится очень большое количество различных частиц, и почти невозможно указать химический состав всех видов встречающихся примесей. Среди частиц органического происхождения преобладают фенол- и карбоксилсодержащие соединения с большим молекулярным весом, включая антрацены, пирены и нафтолы, общая природа которых, по-видимому, одна и та же для всех промышленных районов. Среди неорганических веществ найдены соединения очень многих металлов. Данные Тейбра и Уэррена [8] по содержанию соединений металлов в пылях приведены в табл. 2.2.

В табл. 2.3 и 2.4 приведены данные по концентрациям пыли в воздухе различных районов Великобритании (эти цифры показывают только осажденную [9] пыль и не являются представительными для взвешенной пыли).

Таблица 2.2

Концентрации металлов в атмосфере над территорией США

Металл	Нижний предел, *мкг/м³*	Верхний предел, *мкг/м³*	Металл	Нижний предел, *мкг/м³*	Верхний предел, *мкг/м³*
Цинк	0,4	49	Ванадий	0,002	0,6
Железо	0,23	30	Титан	0,01	0,24
Медь	0,05	30	Никель	0,005	0,20
Свинец	0,33	17	Хром	0,002	0,12
Магний	0,01	3	Кадмий	0,002	0,10
Барий	0,005	1,5	Висмут	0,002	0,03
Олово	0,004	0,8			

Таблица 2.3

Данные по осаждению пыли в Великобритании (средние значения в *г*/100 *м²* в месяц)

Районы	Нерастворимый материал	Растворимый материал
Сельские	85	235
Населенный пригород	352	274
Городские:		
центральные парки	392	352
промышленные	745	352
особо промышленные	5500	1175

Таблица 2.4

Концентрация дыма в городах Великобритании (средние зимние условия)

Город	Концентрация, *мг/м³*
Лестер:	
при западных ветрах	0,06
при ветрах всех направлений	0,10
Теддингтон	0,14
Билстон	0,39
Глазго	0,66
Лондон	0,84

Данные этих таблиц дают общее представление об уровнях концентрации аэрозолей в разных районах, однако внутри этих районов концентрации могут весьма значительно изменяться даже на расстоянии 500 *м*. Департамент научных промышленных исследований в 1937—1939 гг. провел детальное исследование изменения концентраций над относительно небольшим районом вокруг Лестера [10].

Свойства атмосферной пыли различны в разных районах, но и в одном районе они изменяются в зависимости от времени года.

Таблица 2.5

Изменение концентрации пыли в Лондоне в районе обсерватории Кью

Годы (только в зимнее время)	Концентрация, $мг/м^3$	Годы (только в зимнее время)	Концентрация, $мг/м^3$
1924—1927	0,3	1936—1939	0,16
1927—1930	0,23	1939—1942	0,23
1930—1933	0,26	1942—1945	0,22
1933—1936	0,30	1945—1948	0,16

В качестве примера приведем данные наблюдений Митхэма [9] по запыленности района Лондона в течение многих лет (табл. 2.5).

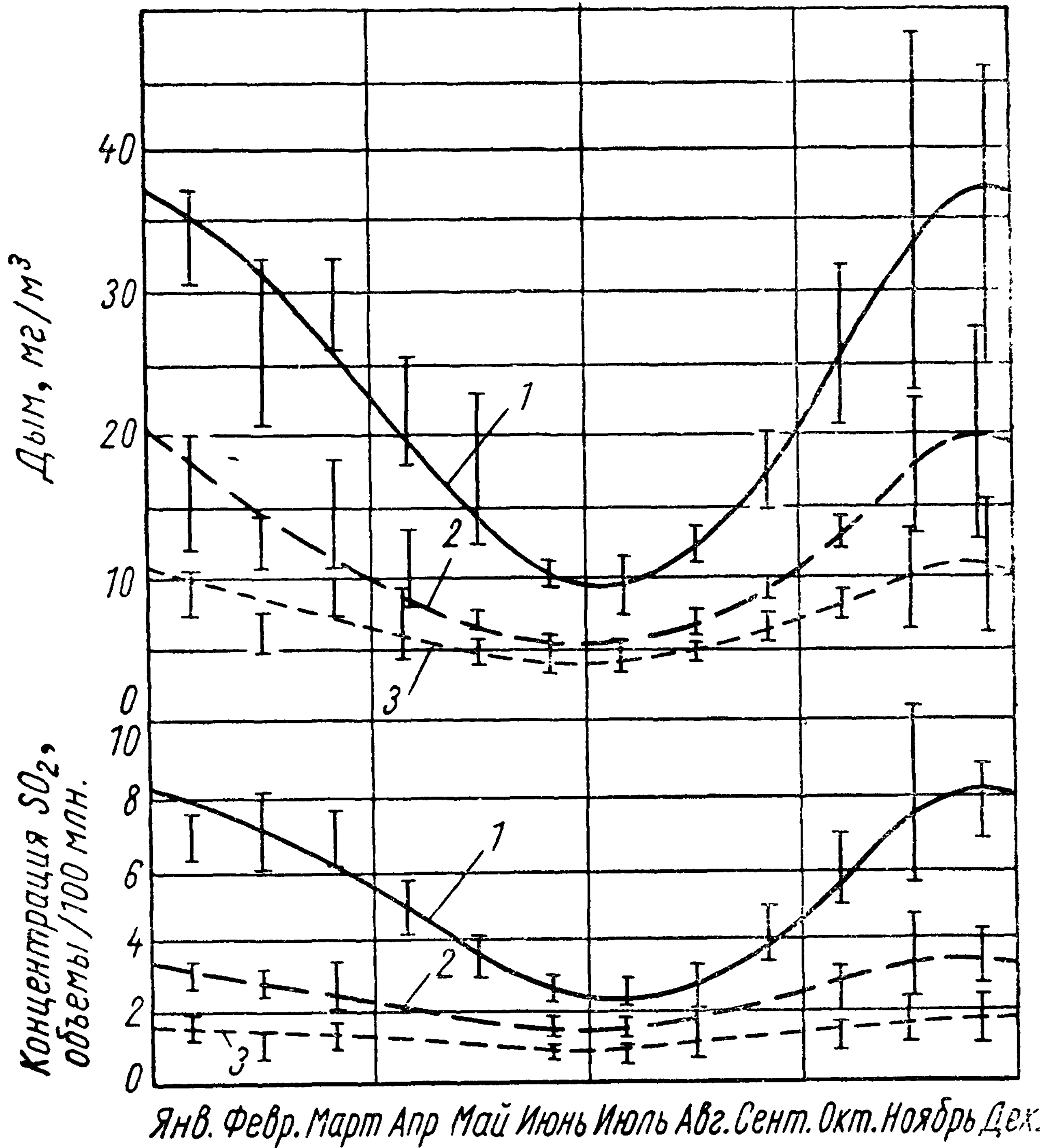


Рис. 2.3. Годовой цикл аэрозольных загрязнений в Лестере (1937—1939 гг.):

1 — среднее по данным четырех центральных станций; *2* — среднее по данным шести пригородных станций; *3* — среднее по данным двух сельских станций.

Максимальные уровни концентраций аэрозолей наблюдаются в зимние месяцы, минимальные — летом. Митхэм отмечает, что в большинстве мест концентрация дыма зимой в 2—3 раза выше, чем летом (рис. 2.3). Отмечаются также и недельные циклы: уменьшение концентрации на 20—40% к концу недели. В большинстве промышленных районов Лондона наблюдаются суточные изменения: максимальная концентрация отмечается дважды — около 8 *ч* утра и 8—10 *ч* вечера. Минимальные концентрации составляют около

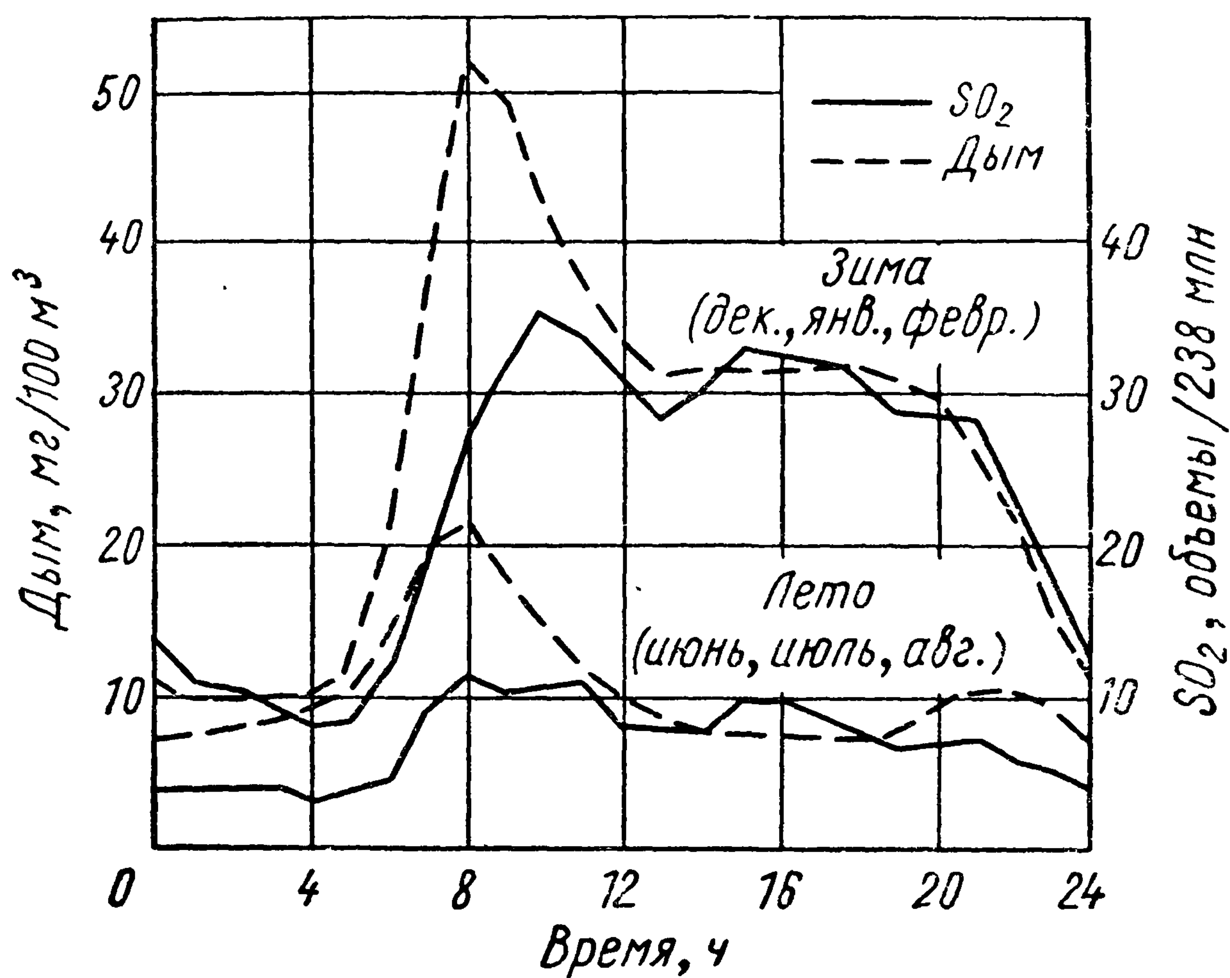


Рис. 2.4. Суточный цикл изменения концентраций дыма и двуокиси серы.

30% максимальных (рис. 2.4). Эти колебания вызываются в основном интенсивным сжиганием топлива и большим количеством промышленных выбросов в определенное время суток.

Природа атмосферной пыли и размер частиц в ней

До 85% всех атмосферных аэрозолей в городских или промышленных районах составляют продукты неполного сгорания топлива—дым (рис. 2.5). Другие частицы, размеры которых позволяют им находиться значительное время во взвешенном состоянии, выбрасываются из труб или поднимаются с поверхности земли, а также возникают в результате испарения морских брызг. Свойства дыма определяют основные свойства атмосферных пылей.

Из закона Стокса следует, что частицы размером менее 10 *мкм* будут разноситься естественными воздушными течениями. Но при тщательном исследовании дыма электронно-микроскопическими методами выяснилось, что около половины составляющих его индивидуальных частиц по счету имеет размер меньше 0,075 *мкм*, полови-

на частиц по весу — больше 0,5 *мкм*, половина общей площади поверхности принадлежит частицам крупнее 0,35 *мкм*. Мелкие частицы имеют тенденцию образовывать агрегаты размером около 1 *мкм*.

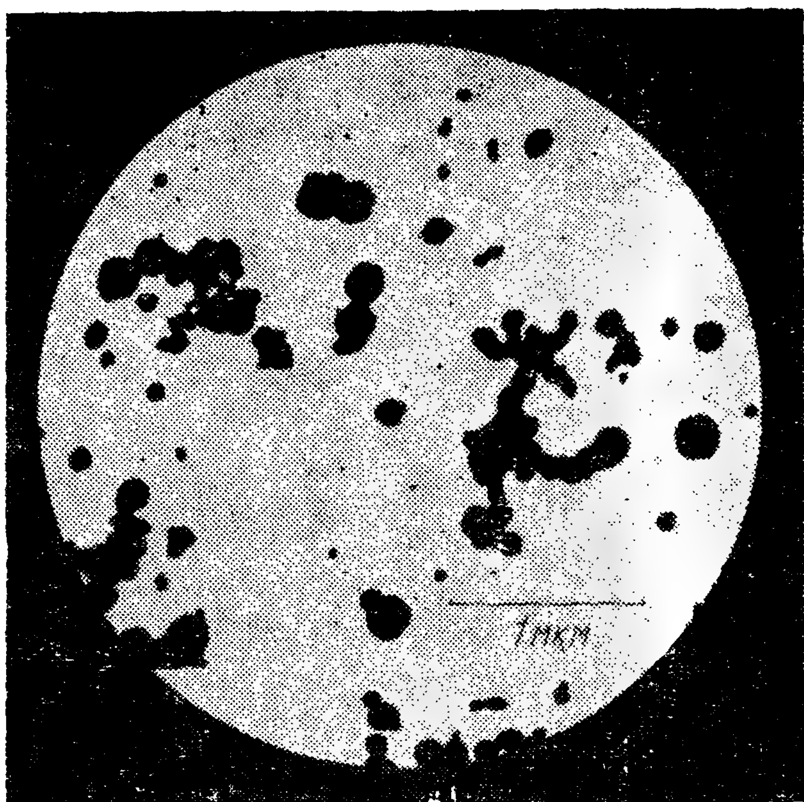


Рис. 2.5. Электронная микрофотография частиц дыма [9].

Атмосферные частицы и фильтрация

Атмосферные аэрозоли играют очень важную роль в процессах высокоэффективной фильтрации, так как концентрация их может быть настолько высокой, что потребуются первичные пылеулавливающие устройства независимо от того, предназначены фильтры просто для получения чистого воздуха или для улавливания нежелательных веществ из воздуха рабочих помещений или технологических газов.

При проектировании любых фильтрующих установок желательно знать природу местных атмосферных загрязнений, их концентрацию и размер частиц. Представленные выше данные будут полезны при оценке возможной пылевой нагрузки на фильтрующие установки, а также степени достоверности проводимых измерений. Однако такие данные не могут заменить реальных и точных измерений, так как изменчивость пылевых концентраций в атмосфере слишком велика.

Табачный дым

Для очистки воздуха от табачного дыма́ используются высокоэффективные фильтры, поэтому естествен тот интерес, который проявляется к этому виду загрязнения атмосферного воздуха.

Оценки эффективности и сроков службы фильтров по табачному дыму проводились на установке, схематически представленной на рис. 2.6. Засасываемый воздух *1*, предварительно отфильтрованный в целях предотвращения забивания испытуемого фильтра атмосферной пылью, поступает в генератор дыма *2*, где установлены горящие сигареты. Разрежение в этой части установки создается вентилятором *3*, а поток воздуха контролируется таким образом, чтобы обеспечить требуемую скорость горения сигарет. Табачный дым поступает в смесительную камеру *4* и из нее нагнетается вентилятором *5* в испытуемый фильтр *6*.

Для сокращения времени испытаний скорость сгорания табака специально подбирают. Для этого задаются количеством одновременно курящих людей (допустим, 50% по 5 сигарет в 1 *ч*) и подсчитыва-

ют количество табака, которое должно сгореть за данный промежуток времени (скажем, 100 *ч*). Затем рассчитывают скорость горения, заданную для проведения ускоренного испытания (допустим, в течение 6—8 *ч*). Разрежение и скорость потоков подбирают таким образом, чтобы привести в соответствие количество сгоревшего табака с требуемым объемом пропущенного воздуха. Если допустить, что в систему рециркуляции будет дополнительно вводиться 283 *л/мин* свежего воздуха в расчете на одного человека, а всего в системе рециркуляции воздуха будет в 2—4 раза больше, т. е. только в ре-

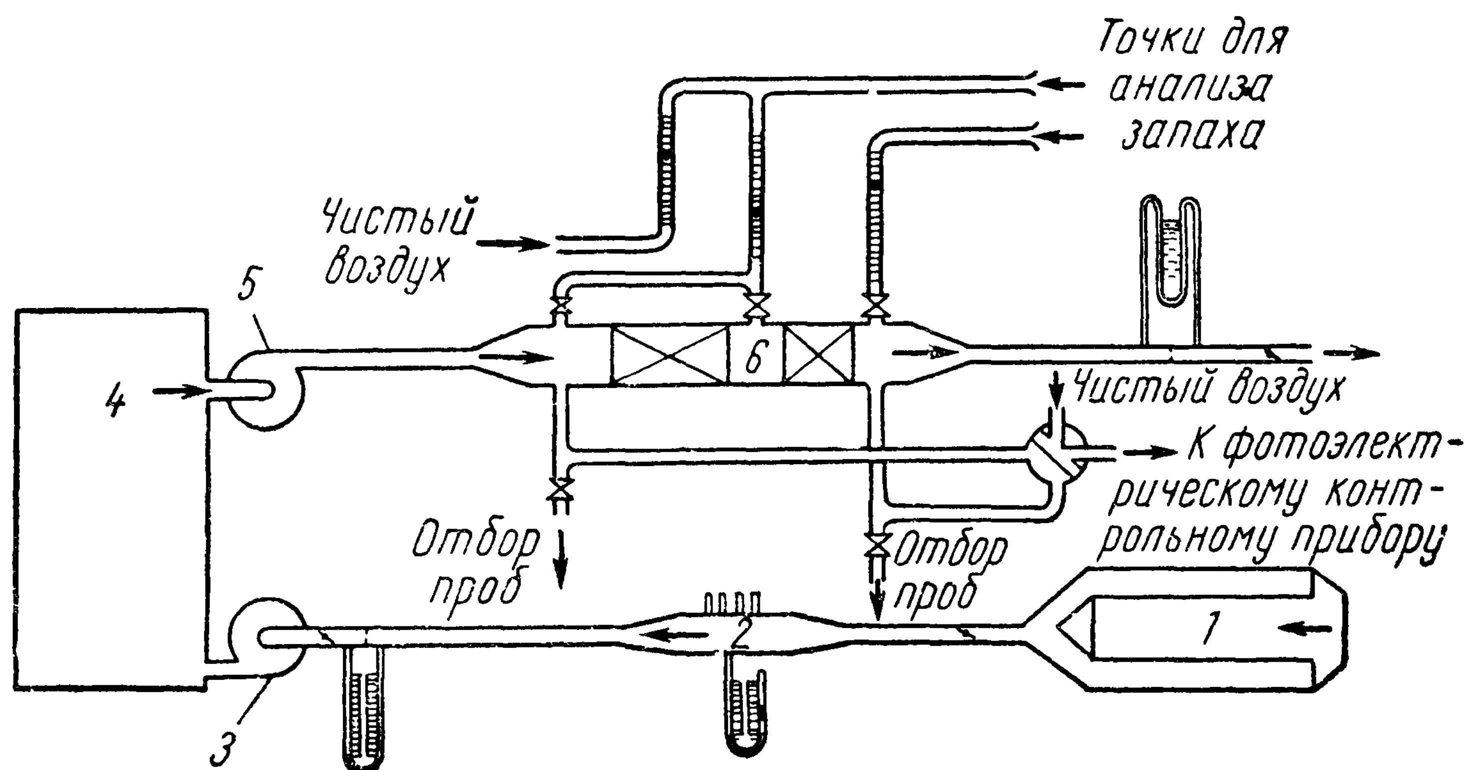


Рис. 2.6. Схема установки для испытания фильтров по табачному дыму.

циркуляции будет участвовать около 850 *л/мин*, то это будет соответствовать сгоранию табака от 2,5 сигарет в 1 *ч*.

В этих условиях время жизни «абсолютных» фильтров составило почти 6 месяцев при относительно чистом атмосферном воздухе.

Бактерии

Удаление микроорганизмов необходимо для стерилизации воздуха во многих биохимических процессах, а также в больницах. Свойства таких аэрозолей заслуживают особого обсуждения с точки зрения их фильтруемости. Цветочная пыльца растений и некоторые виды грибковых плесеней рассеиваются на большие расстояния и вызывают некоторые заболевания (например, сенную лихорадку) или оказывают влияние на обострение таких болезней, как астма и бронхит. Размер этих микроорганизмов 10—50 *мкм*, но может быть 5 *мкм*.

Бактерии — это мельчайшие одноклеточные организмы, размер которых колеблется по толщине от 0,5 до 2 *мкм* и в длину — от 0,5 до 26 *мкм*. В период размножения они могут образовывать колонии в виде бесформенных сгустков или цепочек. В этом случае они ведут

себя как агрегаты из частиц, однако могут легко распадаться на отдельные частицы (например, *Hemophilus influenzae* 0,2—0,3 *мкм* толщиной и 0,5—3 *мкм* в длину, *Bacillus anthracis* 1,0—2,0 *мкм* толщиной и 5—10 *мкм* в длину).

Размер *Actinomycets*, стоящих в середине между действительными бактериями и спорами, обычно около 1 *мкм*, а действительных спор или *Eumycetes* — 5 *мкм*.

Вирусы — паразитические организмы, размножающиеся только в условиях живой клетки, обычно значительно меньше, чем бактерии: от 0,012 *мкм* (полиомиелит) до 0,3 *мкм* (пситтакоз).

В нормальном воздухе для существования бактерий всегда имеется среда, состоящая из пыли, почвы, воды, испражнений и т. д. Стафилококки были обнаружены над поверхностью земли на высоте до 1,5 *км*. Для некоторых бактерий характерны большие патогенные свойства, хотя среди них имеются и полезные культурные бактерии.

Воздух над морями, пустынями и в горах практически не содержит бактериальных загрязнений, в то время как в 1 $м^3$ городского малозапыленного воздуха находится 35—70 бактерий. При проектировании в качестве нормальной концентрации принимается 1750—3500 бактерий в 1 $м^3$. Однако на частицах пыли накапливается значительное количество бактерий и в запыленном помещении с плохой вентиляцией может содержаться до 35 000 бактерий в 1 $м^3$.

Капельная инфекция является главным источником патогенных организмов в воздухе. Капли, которые содержат бактерии и вирусы, быстро испаряются, оставляя в воздухе бактерии, живущие несколько дней [11, 12].

Нормы, которых придерживаются при удалении микроорганизмов из воздуха, сильно зависят от характера проводимых процессов и требований к выпускаемой продукции. Если опасность загрязнений достаточно велика, то необходимо использовать фильтры с коэффициентом проскока по аэрозолю метиленовой голубой меньше 0,003%. В этом случае концентрация микроорганизмов в выходящем из фильтров воздухе будет равна нулю. Если бактериальная оценка внутри стерильных кабин производится с использованием плоских чашек с агар-агаром, то обнаружение бактерий обычно свидетельствует только о случайном загрязнении от людей или о том, что бактерии проникли, миновав фильтрующую установку.

В обычных технологических помещениях или лабораториях, в которых проводятся биологические работы, целесообразно поддерживать общий уровень содержания микроорганизмов порядка 35 000 на 1 $м^3$ воздуха, т. е. около 10^{-5} $мг/м^3$.

Промышленные пыли

Уровни запыленностей в производственных помещениях могут быть значительно выше, чем в атмосферном воздухе наиболее загрязненных промышленных районов.

Однако опубликовано очень мало конкретных данных об уровнях запыленности как исследовательских, так и технологических помещений тех отраслей промышленности, в которых низкие предельно допустимые концентрации требуют установки высокоэффективных фильтров. Поэтому необходимо в каждом случае проводить пыле-газовые замеры, определяя концентрацию и дисперсный состав пыли на каждой операции технологического процесса. Затем следует установить контролирующие устройства (укрытия для отсосов и т. д.) в тех местах, где необходимо предотвратить образование концентраций пыли выше предельно допустимых для рабочих помещений. Аспирируемый из этих устройств воздух подвергают специальной очистке, чтобы не загрязнять окружающую атмосферу.

АЭРОЗОЛИ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Введение

Атомная промышленность находится на ранней стадии своего развития, поэтому целесообразно кратко остановиться на специфических особенностях.

В последние десятилетия мировая общественность не раз поднимала вопрос о недопустимости беспорядочных выбросов промышленных отходов в атмосферу. Наиболее опасны выбросы дыма и двуокиси серы при сжигании углей, так как они вызывают легочные заболевания среди населения промышленных и городских районов.

В это же время возникла проблема воздействия радиоактивной радиации на организм человека и другие биологические системы. Выяснилось, что рентгеновские лучи оказывают опасное воздействие на рабочий персонал, подвергавшийся длительному облучению. Развитие ядерного оружия стимулировало интенсивную работу в этой области.

Международная комиссия по радиологической защите приняла так называемые предельно допустимые уровни радиационного облучения, которые в общем достаточно низки, чтобы оказать заметное вредное воздействие на здоровье отдельных людей и всего населения. Так как наши знания о радиационных воздействиях пока еще очень ограниченны, особенно в отношении низких уровней облучения, то значения предельно допустимых уровней взяты с гарантией.

С момента зарождения атомной промышленности существуют одобренные всеми моральные и правовые требования по обеспечению безопасности здоровья рабочего персонала и всего населения. Таким образом, ошибки ранней стадии промышленной революции не повторились. Пинней [13] в обращении к Британскому институту радиологии отметил, что в атомно-энергетической промышленности Великобритании обеспечены прекрасные условия безопасности, однако высказал пожелание, чтобы экономичность и рациональность сочетались с требованиями безопасности, а также отметил, что контроль за радиоактивностью должен быть более жестким.

Налагаемые ограничения, в принципе никем не оспариваемые, могут привести к серьезным трудностям с точки зрения экономичности производства, если при выборе технологии и разработке оборудования этим вопросам не уделять должного внимания. Отсюда следует, что системы фильтрации должны быть не только высокоэффективными, но и экономичными. Оценка стоимости заставляет обычно возвращаться к изысканию таких технологических процессов, для которых характерны минимальные количества выбросов в виде тонкодисперсных аэрозолей. Кроме того, необходимо дополнительно предусматривать мероприятия по обеспечению возможности эффективной работы во время аварий, например при пожаре или при нарушении режима работы реактора, чтобы можно было свести до минимума возможный выброс наиболее вероятных продуктов.

Образование тонкодисперсных частиц, способных длительное время находиться во взвешенном состоянии, а при оседании снова легко распыляться, зависит от характера технологического процесса и природы перерабатываемого материала. Например при дроблении урановой руды, а также на операциях грохочения и просеивания основные свойства образующейся пыли определяются видом руды. Образование тумана, брызг и возгонов при химической переработке урана и плутония в производстве топливных элементов, при выделении плутония из реакторного топлива и при получении радиоактивных изотопов для различных целей зависит от вида используемых аппаратов, реакций и реагентов. Очевидно, для снижения стоимости защитных укрытий и установок для фильтрации следует провести исследования механизмов образования частиц и капель в ходе технологических процессов, а также изучение свойств сформировавшихся частиц для различных материалов.

К наиболее интересным и хорошо изученным аэрозолям атомноэнергетической промышленности относятся выбросы продуктов деления от топливных элементов реакторов, а также частицы, образующиеся из плутония и других радиоактивных элементов и их смесей. Первые аэрозоли образуются при неконтролируемом отклонении в режиме работы реакторов в результате повреждения оболочек топливных элементов или при несчастных случаях с топливными элементами после их удаления из реактора. Все технологические операции должны оборудоваться соответствующими защитными укрытиями и вентиляцией. Очень важно знать характеристики аэродисперсных систем, которые должны обрабатываться высокоэффективными фильтрами.

Стеннард [14], оценивая опасность радиоактивных частиц для органов дыхания, пришел к выводу, что в атомной промышленности наибольшее число людей подвергается вредным воздействиям на операциях добычи и переработки урановых руд, поэтому здесь необходимы эффективные системы вентиляции и хорошая респираторная защита рабочего персонала. Удельная активность материала частиц очень низкая, однако одновременное наличие силикозоопасной рудной пыли усложняет проблему защиты.

Оценка опасности

Обычно считают, что наиболее вероятным путем проникновения аэрозольных частиц в организм человека служат органы дыхания. Легкие являются относительно чувствительным органом к радиации, и максимально допустимый уровень должен рассчитываться именно для них, а не для желудочно-кишечного тракта, который способен содержать большее количество материала, не поглощая его внутри системы. Легочные лимфатические узлы, на поверхности которых осаждаются частицы нерастворимого материала, в некоторых случаях ограничивают время экспозиции. Токсические свойства аэрозольных частиц определяются не только наличием в материале радиоактивных атомов, но и распределением частиц по размерам, а также химическим составом. В дыхательную систему человека при вдыхании могут проникнуть частицы размером до 10, а иногда и до 20 *мкм*. При обычных условиях работы и жизни только эти очень мелкие частицы длительное время могут оставаться в воздухе во взвешенном состоянии. На важность знания количества радиоактивных веществ, находящихся в воздухе в виде частиц, способных осаждаться в легких, указывал Стеннард [14].

Частицы всех размеров, за исключением наиболее крупных (более 100 *мкм*), могут попасть в рот с пищей или вообще с рук. Такой вид распространения радиоактивных загрязнений должен быть предотвращен с помощью административных мер и соблюдения правил гигиены. Заглатывание радиоактивных веществ обычно рассматривается как наименее опасный путь их поступления в организм человека.

Очень большое значение имеет растворимость токсических веществ, так как это определяет возможность проникания их в кровь через стенки легких, желудочно-кишечного тракта или кожные покровы. Знание растворимости веществ может служить некоторым руководством по предсказанию их вероятного поведения в биологических системах, однако оценка растворимости должна проводиться с большой предосторожностью. Количества рассматриваемых веществ весьма малы (от нескольких миллиграммов для радиоактивных элементов с низкой удельной активностью до нескольких микрограммов по мере возрастания удельной активности), в то время как объем жидкости в теле намного больше и время для протекания реакции также велико. Низкая растворимость таких веществ, как AgI или $SrSO_4$, не является надежным показателем применительно к дыхательной системе. Однако прокаленные окислы, например двуокись плутония, могут быть отнесены к нерастворимым. Это подтвердили эксперименты на животных, хотя небольшие доли (менее 1%) были найдены в костях мышей и собак. Очень мелкие частицы (менее 0,1 *мкм*) должны рассматриваться как «растворимые», несмотря на их химические свойства, так как частицы таких размеров могут проникать через биологические мембраны.

Классификация радиоактивных аэрозолей

Аэрозоли, образующиеся в горнодобывающей и перерабатывающей атомной промышленности, а также при лабораторных исследованиях или в аварийных случаях (при пожаре или взрыве), могут быть однородными и неоднородными. В большинстве случаев последние более вероятны, и почти всегда количество пыли, поступающей из окружающего воздуха, больше количества входящих в нее радиоактивных веществ. Такие аэрозоли в зависимости от того, образованы они вследствие процессов роста или измельчения, могут быть разделены на две группы.

1. Аэрозоли, возникающие при конденсации газообразных и летучих элементов или соединений сначала в виде зародышей с последующим ростом их за счет дальнейшей конденсации или агрегации, а также при адсорбции активных молекул или атомов на неактивных частицах. Эти аэрозоли могут быть неоднородными, так как при конденсации газов и паров могут происходить реакции и сорбционные явления, а образующиеся ядра конденсации, как правило, захватываются частицами инертной пыли. Если воздух предварительно не был тщательно отфильтрован или не содержал относительно больших количеств конденсирующихся веществ, то распределение частиц по размерам в возникающем аэрозоле будет таким же, как у исходной пыли во время образования.

2. Аэрозоли, образующиеся в результате процессов диспергирования твердых или жидких материалов. Эти частицы могут быть как весьма однородными, так и неоднородными. Более вероятно, что распределение частиц по размерам в этих аэрозолях будет определяться механизмом диспергирования и будет лежать в широкой области размеров, и только фракция наиболее мелких частиц будет иметь значение с точки зрения ингаляции.

Свойства аэрозолей в значительной степени определяются видом исходных радиоактивных изотопов, однако они могут изменяться вследствие появления последующих изотопов цепочки распада. Такой летучий дочерний элемент, как I^{131}, может выделяться из частиц, содержащих Te^{131}. Дочерний элемент может быть растворимым или реакционноактивным в соответствующей биологической среде.

Конденсационные аэрозоли

Свойства аэрозолей первой группы легко проиллюстрировать на примере благородных газов и таких легко летучих элементов, как иод и полоний. В первую очередь следует рассмотреть естественную радиоактивность воздуха, которая довольно детально изучена; она вызывается в основном благородными газами и указывает нормальные уровни радиоактивности в атмосфере. Этому же источнику обязаны относительно высокие уровни радиоактивности воздуха в горных выработках, особенно в урановых рудниках. Благород-

ные газы криптон и ксенон присутствуют в продуктах деления вместе с иодом, поэтому необходимо также остановиться на образовании и свойствах аэрозолей, выделяющихся в качестве продуктов деления. Затем рассматриваются аэрозоли, образовавшиеся в результате газовых реакций, и частицы, получающиеся из элементов с высокой удельной активностью, которые окисляются и при нагревании возгоняются.

Атмосферная радиоактивность. Элстер и Гейтел в 1901 г. обнаружили в атмосфере радиоактивные элементы, которые в результате длительной серии исследований были идентифицированы в виде радона и торона и соответствующих продуктов распада. Обобщение этих ранних исследований было проведено Резерфордом в 1913 г. [15] и Мейером и Швейдлером в 1927 г. [16]; токсичность радона была рассмотрена Лоренцем в 1944 г. [17], а Хултквист в 1956 г. [18] сделал сообщение о радиоактивности среды в домах Швеции.

Изотопы редких газов радона, торона и актинона выделяются в атмосферу из твердых материалов. Они не улавливаются фильтрами, однако продукты их распада хорошо задерживаются, так как образующиеся атомы полония, висмута, свинца и таллия легко адсорбируются на поверхностях фильтрующих элементов. После поглощения таких атомов ядрами конденсации или другими пылевыми частицами в воздухе эффективность их осаждения фильтрами остается той же самой, что и самих исходных частиц, но может быть меньше эффективности осаждения свободных атомов; накопление и соответствующий распад активности происходят в соответствии с периодами полураспада дочерних изотопов. Обычно концентрация радона в воздухе вдали от городов и промышленных районов составляет $5 \cdot 10^{-14}$ *кюри/л*, однако это значение изменяется в широких пределах в зависимости от места расположения и условий погоды. Например, дождь снижает выделение радона из почвы; на урановых рудниках концентрация может достигать 10^{-9} *кюри/л* (например, в Шнееберге и Иохимстале).

Концентрации торона обычно значительно меньше, чем радона. Отчасти это объясняется более коротким периодом полураспада. В исследованиях, проведенных морской исследовательской лабораторией, для Вашингтона получена величина около 10^{-13} *кюри/л* для радона, а для Pb^{212}, образующегося из торона, всего около 1/100 этого значения [19]. Уилкенинг [20] установил, что около 90% активности принадлежит частицам размером менее 0,35 *мкм*. Однако обычно эти продукты распада находятся на присутствующих в атмосферном воздухе пылинках, содержание которых изменяется в зависимости от характера подстилающего района.

Величина естественного радиоактивного загрязнения атмосферы, конечно, ниже предельно допустимых концентраций, однако некоторые специалисты полагают, что для рабочего персонала рудников существующие концентрации при некоторых обстоятельствах опасны для здоровья, так как превышают предельно допустимые нормы, а это может привести к заболеванию легких.

Контроль концентрации аэрозолей путем отбора проб на фильтр проводится во всех лабораториях и цехах, в которых работают с радиоактивными изотопами. Причем наличие естественной радиоактивности обычно оценивается по наличию дочерних продуктов, так как было установлено, что изотопы радона не задерживаются фильтром, и на основе этого факта допускают, что радон плохо поглощается частицами пыли.

Редкие газы продуктов деления. При недостаточной герметичности изотопы криптона и ксенона, образующиеся в процессе деления внутри топливных элементов или защитных устройств, будут выделяться в охлаждающий газ или в атмосферу. Продукты распада этих элементов могут быть обнаружены в отфильтрованных пробах. Так, согласно частному сообщению Чемберлена, появление Rb^{88} в фильтрах или в пробоотборных осадках может служить сигналом нарушения герметичности топливного элемента или испытательного контура.

Иод и другие летучие продукты деления. Изучая выделения из облученных топливных элементов в процессе их окисления, Мегоу и др. [21, 29] установили, что вид газа-окислителя оказывает заметное влияние на результаты. В процессе окисления в воздухе при температуре 800° С (до U_3O_8) скорость выделения была прямо пропорциональна скорости окисления, что свидетельствовало о разрушении кристаллической решетки металла в процессе образования окисла и приводило к выделению около 50% иода.

Окисление в углекислом газе при той же температуре приводит к образованию окисла $UO_{2,2}$ и иод при этом не выделяется. При продолжительном нагреве окисел переходит в UO_2 и выделяется до 70% иода. Это дало возможность предположить, что окислы урана в области перехода UO_2 до U_3O_8 представляют собой твердые растворы газообразного кислорода в UO_2, так утверждают Катц и Рабинович, а атомы иода при образовании окислов остаются внутри кристаллической решетки в неизменном виде. При переходе высших окислов в UO_2 с потерей кислорода иод также выделяется. Количество образующихся аэрозольных частиц обычно недостаточно для поглощения всего выделяющегося иода, и он присутствует в смеси с редкими газами в газообразном состоянии. Распределение частиц образовавшихся окислов урана по размерам в различных условиях показано на рис. 2.7. и 2.8.

Было установлено, что если частицы окислов, содержащие иод как продукт деления (I^{131}), выдержать длительное время в избытке паров I^{127}, то от 40 до 70% I^{131} десорбируется. Эти данные свидетельствуют о том, что значительная часть иода адсорбирована на поверхности окислов.

Джиллард и Рид [23, 24] сообщили, что облученный уран более активен в реакциях с воздухом, углекислым газом и паром, чем необлученный металл. По-видимому, это связано с пузырьками и дефектами окисной пленки, образовавшимися в присутствии продуктов деления. При окислении урана, предварительно облученного

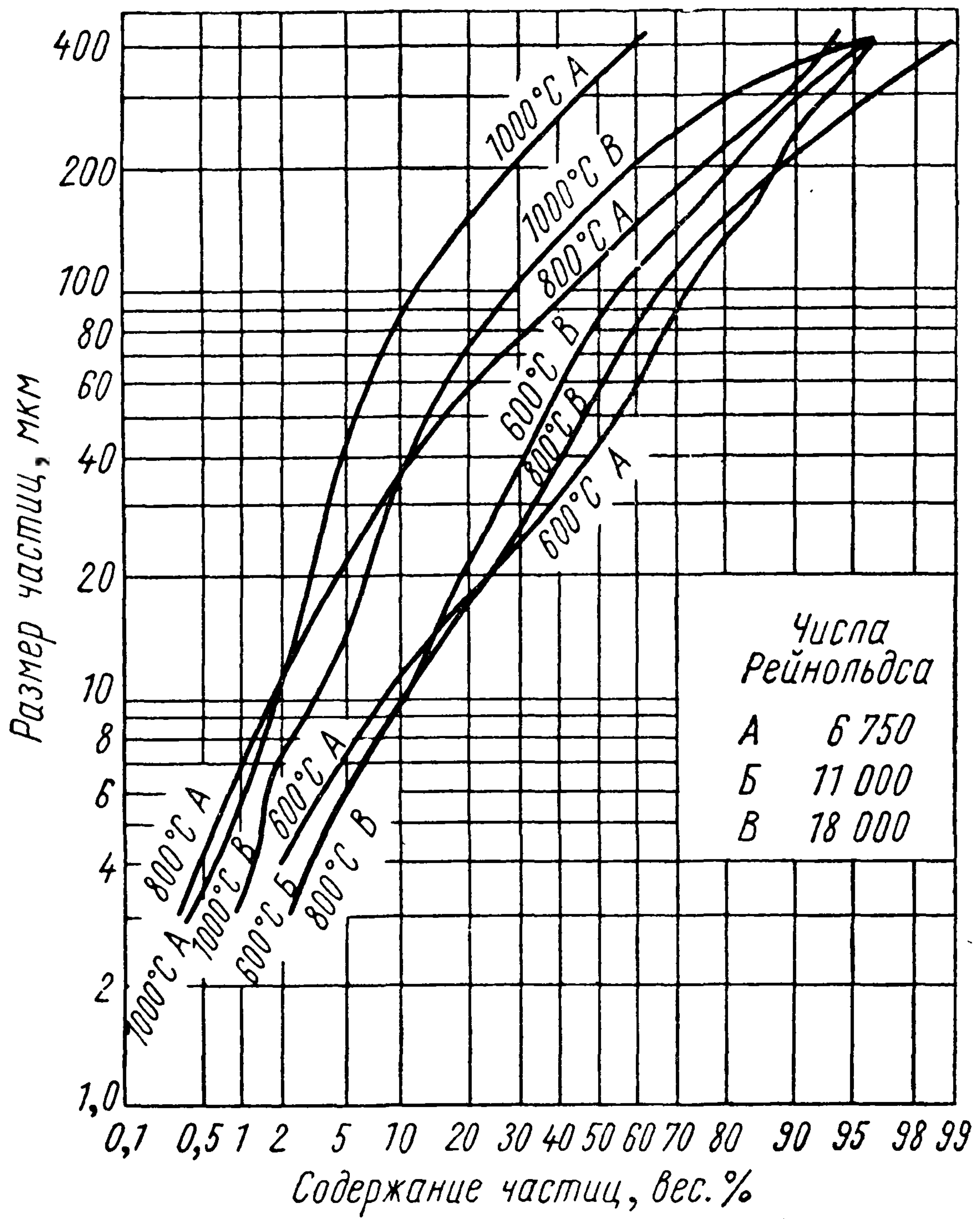


Рис. 2.7. Распределение частиц окислов урана по размерам при окислении в атмосфере двуокиси углерода.

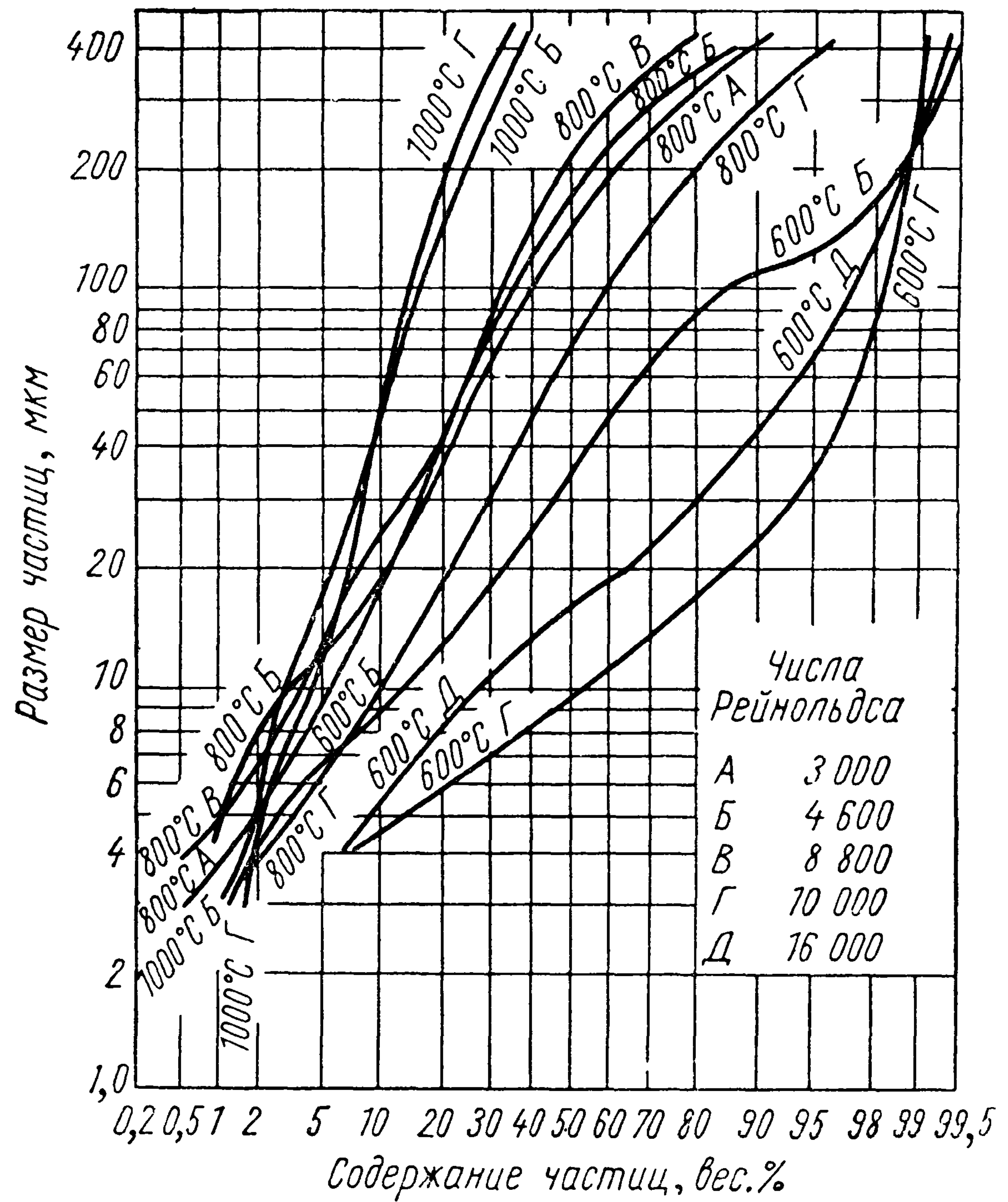


Рис. 2.8. Распределение частиц окислов урана по размерам при окислении в воздухе.

1340 *Мгвт·день/т* на воздухе при температурах 1000, 1200 и 1440° С (т. е. при температурах ниже и выше точки плавления 1132° С), выделяется от 80 до 100% редких газов и иода. Выделение других летучих примесей составило: для цезия — около 80%, для теллура — около 60%, для рутения и молибдена — 5%. Нелетучие элементы стронций, барий, церий, цирконий, уран, нептуний и плутоний почти не выделялись (менее 1%).

Аналогичные результаты исследований были представлены Паркером и др. [25]. Относительные количества элементов — продуктов деления, выделившихся в этих экспериментах, — в общем были такими же, хотя полного соответствия не было. При полном окислении в воздухе при температуре 1200° С выделилось около 80% рутения, главным образом в конце процесса окисления. При окислении в углекислом газе при температурах от 1000 до 1200° С иод выделялся со скоростью, сравнимой со скоростью при окислении в воздухе.

Чемберлен пришел к выводу, что для выделения продуктов деления есть три пути:

1) образование и диспергирование окислов, содержащих продукты деления;

2) «выкипание» продуктов деления из расплавленного топлива;

3) полное испарение топлива и содержащихся в нем продуктов деления.

Конструкции реакторов или всех агрегатов могут быть такими, что улетучивание окислов урана (или плутония) будет незначительным, а скорости газа могут быть слишком низкими, чтобы переносить материалы. Тогда спекание и агломерация приведут к увеличению среднего размера частиц.

Реакции с образованием ядер конденсации. Аэрозоли могут образовываться в результате реакций между газами в объеме с последующей конденсацией одного или нескольких веществ, а также за счет реакций газов с твердыми или жидкими зародышами — ядрами конденсации. Установить различие между этими двумя возможными процессами весьма трудно.

Конденсация пара с образованием аэрозоля была изучена Стюартом [26], показавшим, что при этом формируются очень мелкие частицы, размеры которых лежат в субмикронной области. Начальной стадией является образование зародышей, состоящих из продуктов реакции или из одного из реагирующих веществ. Размер зародышей соответствует агрегату в 100 молекул. Вторая стадия — рост этих зародышей за счет дальнейшей конденсации или коагуляции, причем первый процесс зависит от давления пара, а скорость второго процесса пропорциональна квадрату концентрации зародышей и определяется уравнением (2.3). Сравнение этих двух процессов показывает, что коагуляция является более важным процессом.

Уранилфторид. Примером аэродисперсной системы, образованной в результате реакции газа с парами воды в воздухе, является

аэрозоль уранилфторида, получающегося из гексафторида. Последний используется на газодиффузионных заводах для выделения изотопа U^{235}. Медианный весовой размер частиц в этом аэрозоле, по данным Воегтлина и Ходже [27], составляет 0,1 *мкм*.

Двуокись полония. Образование аэрозоля за счет сублимации и последующей агломерации с другими частицами можно проиллюстрировать на примере окисления полония (неопубликованные данные Стюарда). Этот элемент плавится при 254° С и быстро превращается в окислы в воздухе или кислороде при более высокой температуре. Окислы легко сублимируют при атмосферном давлении и температуре выше 885° С. Образцы, служившие в качестве источников, были приготовлены электролитическим осаждением полония на золото; затем их нагревали в воздухе или непосредственно в зоне сгорания углеводородных паров. Результаты экспериментов, в которых образцы нагревались в воздухе, подтвердили данные о большой скорости образования активных аэрозольных частиц при температуре выше 850° С.

Скорость выделения при повышении температуры от 300 до 900° С (наиболее высокой в опыте) медленно возрастала, причем при 850° С она была 3% в 1 *мин* и при более высокой температуре почти не увеличивалась. Однако для параллельных образцов наблюдалось заметное различие. В экспериментах, в которых материал окислялся в пламени, быстрое образование аэрозолей происходило при более низкой температуре. Скорость образования, равная 3% в 1 *мин*, наблюдалась при температуре 400° С, и выделение полностью заканчивалось при 700° С. Полоний не был свежевыделенным, его очищали перед каждым экспериментом и в конце промежутков времени, равных периоду его полураспада, когда число атомов Po равнялось числу атомов Pb.

Следовательно, вполне возможно, что могло присутствовать соединение PbPo (по аналогии с сульфидом свинца), и это было причиной наблюдаемых различий в скорости выделения. Однако экспериментальные результаты убедительно свидетельствовали о том, что в обоих случаях образовывались тонкие частицы.

При использовании для пробоотбора четырехкаскадного импактора и мембранного фильтра, установленного за ним, было найдено, что самая большая активность (около 95%) содержалась на двух последних ступенях. Такие результаты свидетельствовали о непригодности этих устройств для определения распределения частиц по их размерам применительно к этим аэрозолям. Необходимо использовать метод авторадиографии. Этим методом только очень незначительная доля (менее 0,01%) общей активности была определена в виде звездочек от частичек размером около 0,008 *мкм*, а основная масса частиц имела значительно меньшие размеры. Этот результат получили в эксперименте с сжиганием топлива, причем было установлено, что активность была связана с тонким осадком углерода. Улавливание такой тонкодисперсной активности на четвертой ступени каскадного импактора можно объяснить связыванием поло-

ния частицами углерода, однако осаждение в этом случае зависело от распределения по размерам частиц углерода.

Эти простые опыты показывают, что аэрозоль двуокиси полония, образующийся при горении, вероятнее всего состоит из частиц, характер и размер которых определяются процессом образования, при этом каждая частица несет около 10 000 молекул.

Частицы, образованные путем диспергирования

Многие производственные процессы, начиная с добычи руды и ее измельчения и кончая механической обработкой металла и полировкой готовых деталей, сопровождаются образованием нежелательного побочного продукта — аэрозолей. Аэрозоли легко образуются из жидкостей во время таких процессов, как испарение или абсорбция газов, при контролируемом распылении различных агентов специальными аэрозольными генераторами. Все эти процессы характерны не только для атомной промышленности, и здесь они детально обсуждаться не будут. Однако необходимо отметить, что в целом ряде технологических операций атомной промышленности могут потребоваться исследования способов образования очень тонких частиц, чтобы снизить до минимума скорость их образования, так как количество радиоактивных материалов, которое может быть выброшено в атмосферу, очень мало.

Аэрозоли, образующиеся при плавке, литье и механической обработке плутония и урана (естественного и обогащенного ураном-235), были исследованы весьма ограниченно, но они представляют значительный интерес. Основная причина отсутствия детальных исследований заключается в том, что все эти операции должны осуществляться в тщательно контролируемых условиях, а в случае плутония — в специальных надежных укрытиях. Тем не менее было убедительно установлено, что используемые защитные устройства и процессы отвечают требованиям. Аэрозольные частицы механического происхождения в выбросах названных операций состоят из окиси урана, хотя их состав точно не был определен. Медианный весовой размер частиц изменяется в пределах от 3 до 30 *мкм* со стандартным геометрическим отклонением от 3 до 10.

Аналогичные результаты получили Хиетт и др. [28]. Различия в распределениях частиц по размерам, по-видимому, не были связаны с особенностями операций, а объясняются общими условиями в рабочих помещениях. Возникающие в воздухе концентрации весьма низки и непрерывное оседание более грубых частиц явилось причиной уменьшения медианного весового размера частиц и величины стандартного геометрического отклонения, так как расстояние между источником и местом пробоотбора увеличивалось. Исследование таких частиц окиси урана в электронном микроскопе показало, что в некоторых случаях они представляют собой агрегаты из очень мелких (около 0,02 *мкм*) сферических частиц, образовавшихся в результате испарения расплавленного металла. Типичные электронно-

микроскопические снимки показаны на рис. 2.9. Такие эффекты не наблюдаются в аэрозолях бериллия (рис. 2.10).

Агрегаты из очень мелких частиц обладают значительно меньшим удельным объемным весом по сравнению с истинным удельным весом окислов, так что указанные выше размеры, полученные исходя из удельного веса U_3O_8, равного 8,3 *г/см*^{3}, могут быть значительно меньше. Различие между частицами бериллия и урана может быть объяснено их термическими свойствами. Бериллий имеет не только

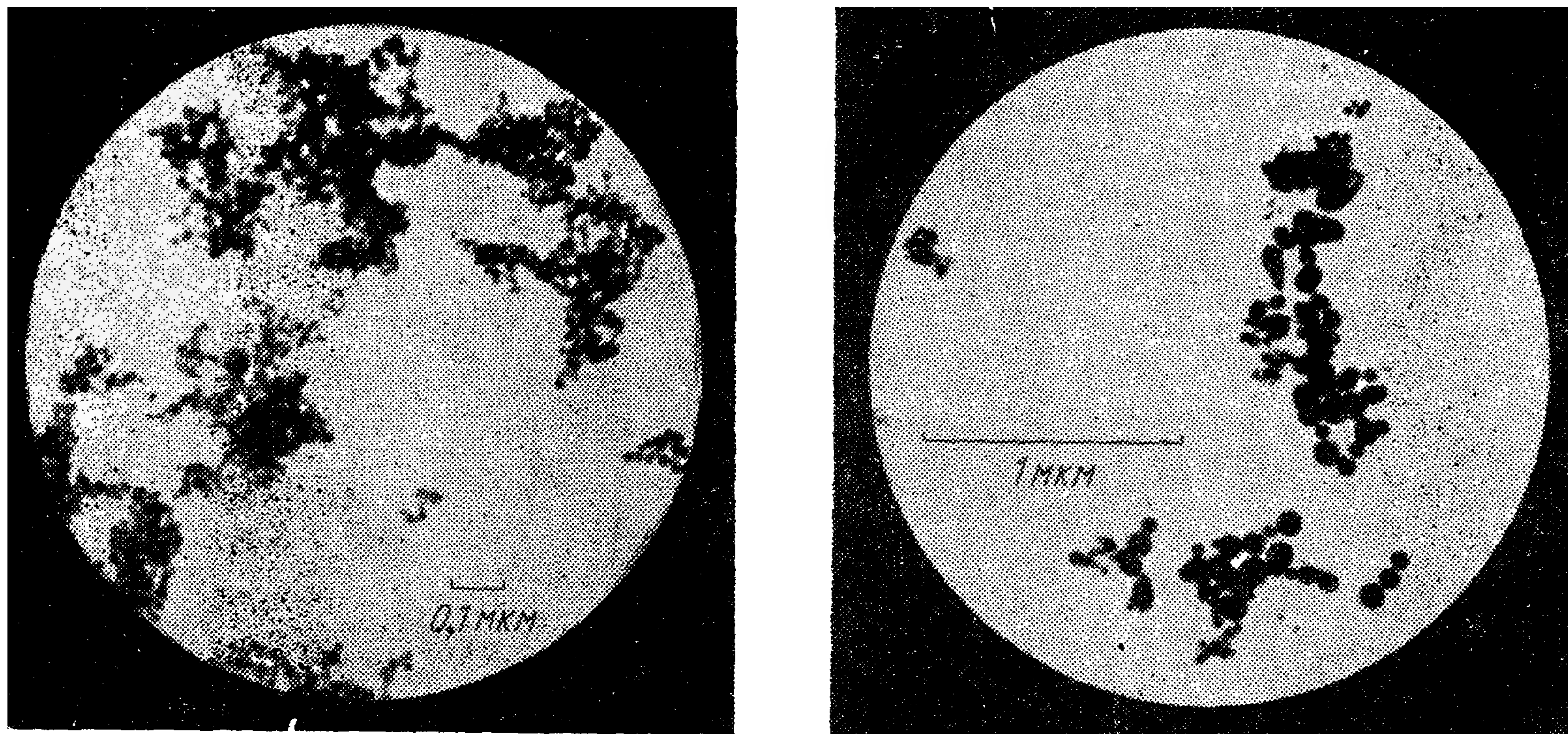


Рис. 2.9. Частицы, образующиеся при резании металлического урана при разном увеличении.

более высокую температуру плавления (1300 °С), но и необыкновенно высокую удельную теплоемкость (0,46 *кал/г*·°С), в 10 раз большую удельной теплоемкости урана.

Частицы плутония, выделяющиеся из укрытий в рабочие помещения лабораторий, были изучены Моссом и др. [29]. Размер частиц лежал в основном в субмикронной области: при получении фторида из нитрата плутония — 0,4 *мкм*, при восстановлении фторида до металла — около 0,2 *мкм* и на операциях по обработке металла—около 0,3 *мкм*. Эти размеры дают представление скорее о способах выделения, чем об образующихся размерах.

Окисление урана. Аэрозоли, образующиеся при окислении урана в различных условиях, изучали Мегоу и др. [21] и в строго ограниченных условиях — Стюарт. Цели этих двух исследований были различными: первые посвящались реакторным проблемам, последние — аварийным случаям, включая сгорание металлического урана. Распределения частиц по размерам для различных условий по данным Мегоу показаны на рис. 2.9 и 2.10. Вообще, частицы окислов получаются тем крупнее, чем выше температура окисления. Скорость газа над поверхностью металла имеет второстепенное значение.

Необходимо отметить, что уран легко воспламеняется при нагревании, при этом температура очень резко возрастает до 1400° С; доля тонкодисперсных частиц окислов в образовавшемся аэрозоле невелика (несколько процентов). Стюарт исследовал аэрозоли окислов урана, образующиеся при окислении металла. Медианный весовой размер частиц, возникающих при сгорании мелких стружек, составлял 10 *мкм*, а стандартное геометрическое отклонение равнялось 5. Аналогичные распределения наблюдались для частиц окис-



Рис. 2. 10. Частицы бериллия, образующиеся при фрезеровании металла (*а*) и при размоле кусочков металла (*б*).

лов, выделяющихся от массивных кусков урана в контролируемых условиях окисления.

Окисление плутония. Аэрозоли, образующиеся при окислении металлического плутония, изучались в Технологической и военной атомных исследовательских лабораториях [30]. В экспериментах использовали чистый металл, который при изменении температуры от комнатной до точки плавления проходил четыре фазы превращений, и δ-стабилизированный сплав. Последний содержал около 1% алюминия, поэтому металл постоянно находился в δ-фазе, хотя в чистом металле δ-фаза существует при температурах 320—470° С. Влияние физической формы, оцениваемой отношением объема к поверхности, изучали с использованием мелкой металлической стружки, дисков и цилиндров.

При нагревании на воздухе плутоний легко окисляется и может воспламениться (под воспламенением подразумевается резкое увеличение скорости окисления, которая не снижается при удалении источника нагрева). Температура резко возрастает до 800—1000 ° С, и жидкий металл заключается в окисленную оболочку. В присутствии достаточного количества кислорода реакция быстро завер-

шается. Температура воспламенения для δ-сплава в виде кусочков размером 1 *см* и больше равна 500° С. Чистый металл более реакционно способен; если он в виде кусочков, то воспламенение наблюдается при 350° С.

Температура воспламенения довольно изменчива и, по-видимому, зависит от характера предварительной обработки металла. Известно, что фазовые переходы уменьшают объемный вес вследствие образования микроскопических пор, и такие материалы более реакционноспособны. Металл в виде тонких листочков или мелкой стружки воспламеняется при более низкой температуре (100° С). Большое значение имеет скорость нагрева. При очень высокой скорости нагрева кускового металла на поверхности образуется прочный слой окислов, который подавляет воспламенение. Даже после воспламенения течение реакции окисления можно прекратить, если ввести азот или такой инертный газ, как аргон. Выделение аэрозолей в таких условиях представляет определенный интерес с точки зрения контроля в аварийных случаях. Этот метод контроля был испытан.

Выделение частиц с поверхности металлического плутония при комнатной температуре происходит очень медленно и заметно зависит от влажности. Очевидно, взаимодействие между металлом и парами воды является основной реакцией при комнатной температуре, а кислород в этом случае играет роль замедлителя, так как он приводит к образованию более плотного слоя окислов. В сухом воздухе, когда объемное содержание паров воды составляет менее 0,01%, скорость выделения аэрозольных частиц равна примерно 10^{-7} *мккюри*/(*см*^{2}·*ч*) для чистого металла и около 0,1 этого количества для δ-стабилизированного сплава. В насыщенном влагой воздухе скорость окисления в 10 000 раз больше. Частицы, поступавшие в воздушный поток, имели медианный весовой размер 0,5 *мкм* в случае сухого воздуха и более 10 *мкм* при 100%-ной относительной влажности. Распределение частиц по размерам в сухом воздухе характеризовалось геометрическим стандартным отклонением около 8.

Поведение металлов обоих видов при температуре свыше 120° С различное: чистый металл окисляется медленно и непрерывно выделяет тонкие частицы, которые легко коагулируют или разрушаются в зависимости от физических условий; увеличение веса во времени для δ-стабилизированного сплава носит ступенчатый характер, при этом периоды постоянного веса хорошо различаются. В последнем случае во время разрушения слоя окислов и его возобновления выделяется значительно больше аэрозольных частиц, чем в периоды покоя. Изучение распределения частиц окислов по размерам для δ-фазы показало, что медианный весовой размер частиц равен приблизительно 10 *мкм*, а стандартное геометрическое отклонение 12.

В случае воспламенения, когда металл расплавлен, никакого различия между частицами окислов с обоих видов металла не наблюдается. Частицы, выделяющиеся при реакциях, протекающих

почти при статических условиях, очень похожи на частицы, образующиеся в период медленного окисления при более низких температурах. Однако основная масса образующихся окислов имеет весьма различное распределение по размерам, при этом медианный весовой размер частиц достигает нескольких сот микрон и только 0,1%

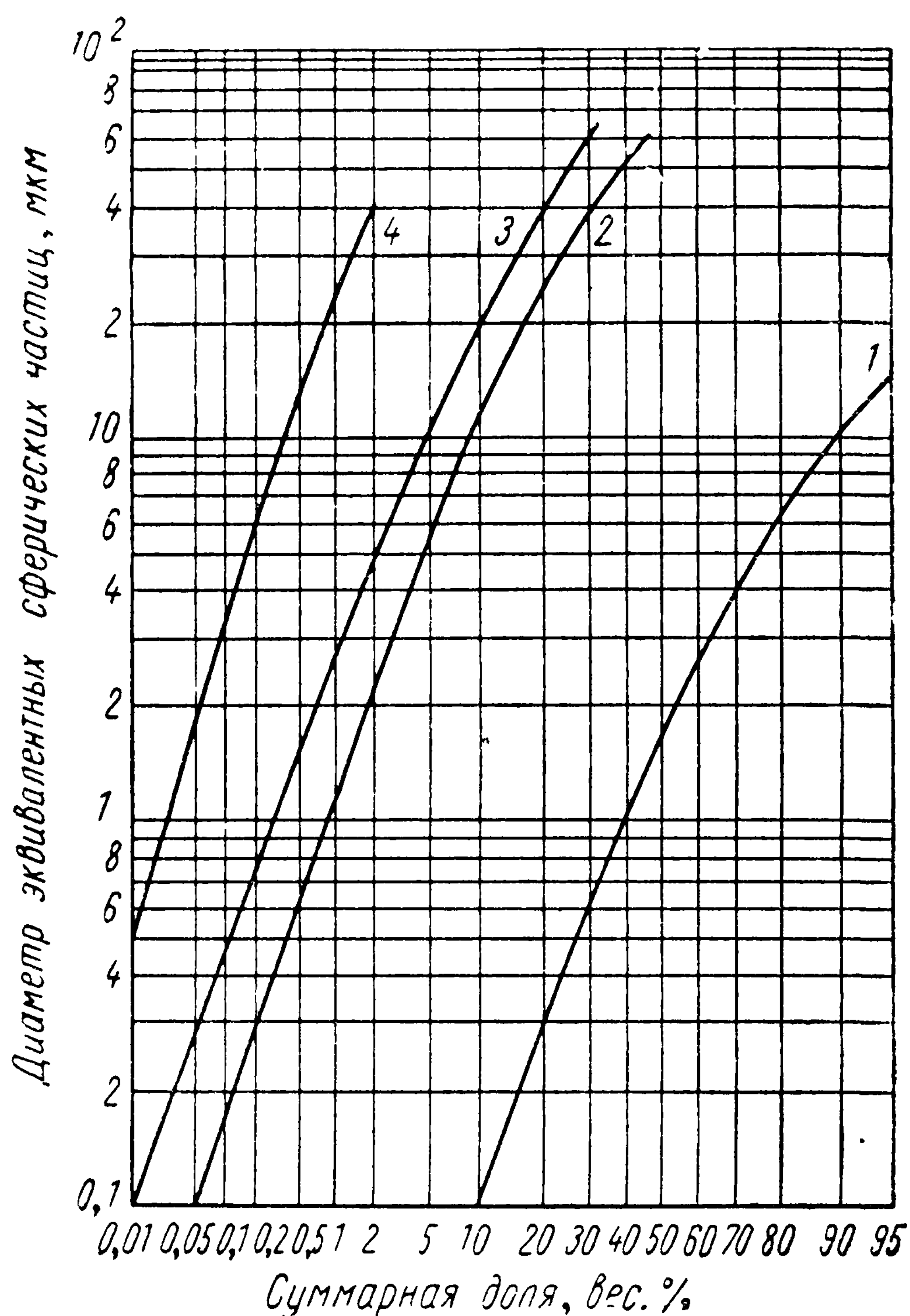


Рис. 2.11. Распределение частиц по размерам при окислении плутония в различных условиях:

1 — частицы, образующиеся при всех температурах в неподвижном воздухе; 2 — окислы, образующиеся из стабилизированного сплава при 123° С; 3 — окислы, образующиеся при 400—500° С; 4 — окислы, образующиеся при температуре выше точки воспламенения.

имеет диаметр меньше 3 *мкм* (в расчете принимается плотность PuO_2).

Было установлено, что при подавлении воспламенения δ-стабилизированного сплава азотом выделение частиц окислов не изменяется в период охлаждения. Однако для чистого металла выделение может быть в 100 раз большим, что, очевидно, связано с изменениями в плотности при фазовых переходах металла. Эти частицы обладают таким же распределением по размерам, что и аэрозоли, образующиеся при статических или близких к ним условиях при всех температу-

рах воздуха. Характерные распределения частиц по размерам применительно к ряду выбранных условий окисления показаны на рис. 2.11 [30]. Все аэрозоли, за исключением объемистой рыхлой окиси, образующейся от чистого металла при температуре 120° С, не обладают ярко выраженной способностью к агрегации. Однако в пробах, отобранных с помощью каскадного импактора, на операции, при которой происходит окисление чистого металла при температурах ниже точки воспламенения, было отмечено разрушение некоторых частиц.

Аварийные выбросы

Аварийные выбросы в атмосферу радиоактивных веществ в виде аэрозолей могут быть различных масштабов: от незначительных утечек в контейнерах или в отдельных деталях лабораторных установок до аварий, связанных с реакторами или с большими количествами таких материалов, как плутоний. Защита обслуживающего персонала лабораторий от чрезмерного облучения при небольших выбросах обычно обеспечивается системой мероприятий, проводимых службой техники безопасности.

Аварийный выброс большого количества радиоактивных веществ является крайне редким событием. Тем не менее необходимо иметь установки и устройства, которые могли бы обеспечить быстрое проведение защитных и ремонтных мероприятий. Для их эффективного осуществления необходимы данные о природе и количестве веществ, выделение которых наиболее вероятно. Особенно это относится к частицам, опасным для вдыхания. Такая информация приведена выше для аэрозолей окислов плутония и урана, образующихся при сгорании металлов, и для некоторых других соединений, однако очень многое еще требуется изучить.

Для любого способа выброса необходимо оценивать величину выброса и возможность рассеивания ветрами. Перемещение облаков газа и дыма детально исследовано в течение последних трех десятилетий. Образцовыми в этом отношении являются работы Саттона [31] и Пасквилля [32].

Неконтролируемые отклонения в работе реакторов

Возможность неконтролируемых отклонений в работе реактора, вследствие которых в атмосферу может быть выброшено большое количество радиоактивности, в значительной степени уменьшена за счет рациональных конструктивных решений. Вместе с тем повреждение реактора в Уинскейлсе показало, что такая возможность существует [33].

В этой аварии наиболее важными продуктами деления были иод (главным образом изотоп I^{131}), Te^{132} и Cs^{137} (отношение I^{131} к Cs^{137} равнялось 50) [1]. Осталось неизвестным, какое количество I^{131} находилось в виде пара и в адсорбированном виде на субмикронных

частицах, которые проходили через фильтры или присутствовали в атмосфере. Лабораторные исследования показали, что иод хорошо адсорбируется многими веществами и плохо десорбируется. Было установлено, что менее 5% активности, осевшей вблизи объекта, связано с частицами крупнее 1 *мкм*.

На основе изучения осадков Чемберлен [34] пришел к выводу, что I^{131} частично находился в виде пара, а частично в адсорбированном состоянии на субмикронных частицах. Оседание из парообразного состояния происходит обычно значительно скорее. Отношение I^{131} к Cs^{137} уменьшилось с увеличением расстояния от реактора. Общая величина выброса I^{131} была оценена в 27 000 *кюри*.

Поглощение иода фильтрующей системой является одной из главных проблем обеспечения безопасности реакторов (более подробно эта проблема обсуждается в гл. VII).

Огонь

Возможности появления огня в технологических линиях производства урана и плутония нельзя полностью исключить, хотя предпринимаются значительные усилия в этом направлении. Значительный интерес представляют экспериментальные работы по изучению образования аэрозолей окислов урана и плутония. Для уменьшения выбросов в атмосферу необходимо применение высокоэффективных огнестойких фильтрующих систем.

Заключение

Наиболее важной характеристикой аэрозолей с точки зрения фильтрации является размер частиц. При наличии летучих элементов или соединений аэрозоль формируется вследствие их адсорбции на частицах пыли, находящейся в воздухе, или конденсации с последующей коагуляцией. В обоих случаях размер частиц не превышает нескольких микрон. Вместе с тем размер частиц, образующихся в результате механического дробления, например при разрушении твердого слоя окислов, может достигать нескольких сотен микрон, и только незначительная доля этих частиц будет тонкодисперсной, хотя последнее наблюдается не всегда (см. рис. 2.13).

В случае высокоактивных веществ, весовое количество которых ничтожно мало (например, I^{131} и Po^{210}), присутствие частиц-носителей может благоприятствовать процессу фильтрации, поэтому специальное введение в поток перед фильтрами частиц соответствующего размера и в нужной концентрации может иметь практическое значение. Очевидно, если пары или ядра конденсации удаляются из газовой фазы вследствие адсорбции на твердых частицах, необходимо оценивать условия, при которых эти процессы могут быть обратимыми.

Существует целый ряд химико-технологических процессов, характеризующихся образованием очень мелких частиц. Эти про-

цессы должны быть тщательно изучены с точки зрения фильтрации таких частиц. Например, при концентрировании растворов выпариванием или при проведении в растворах реакций, сопровождающихся кипением, в результате разрыва пузырьков в газовый поток поступают капельки растворов, которые в потоке испаряются, образуя тонкодисперсный аэрозоль. Очевидно, концентрация раствора и его поверхностное натяжение являются определяющими факторами в образовании частиц определенного размера. От распада жидких капель в воздушном потоке, по-видимому, зависят предельные размеры частиц, которые могут быть образованы [3, 35].

Таким образом, при проведении химико-технологических операций с токсическими материалами необходимо иметь ясное представление о процессах, определяющих возникновение аэрозолей. В тех случаях, когда обеспечение мероприятий по безопасной работе связано с большими затратами, необходимо усовершенствовать или изменить технологический процесс, чтобы снизить до минимума количество образующихся тонкодисперсных токсичных аэрозолей.

ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТЬ ПЫЛЕЙ

Воспламеняемость пылей — одно из свойств, которое необходимо учитывать при выборе фильтров и проектировании фильтрующих установок. Степень важности этого свойства зависит от последствий, которые могут возникнуть при разрушении фильтра. Появление огня на фильтре может или вывести фильтр из строя или резко снизить его эффективность. Если улавливаемые вещества являются высокотоксичными (например, плутоний), то разрушение фильтра может привести к серьезному распространению радиоактивности.

Вещество воспламеняется в том случае, если скорость поступления тепла от реакции (обычно при окислении воздухом) больше, чем потеря тепла. Следовательно, возможность воспламенения зависит не только от свойств вещества, но и от состояния, в котором оно находится, и от окружающих условий. Любая оценка воспламеняемости (например, температуры вспышки) имеет только относительное значение. Необходимо напомнить, что аэрозольные частицы, улавливаемые фильтром, весьма тонкодисперсны и это увеличивает их воспламеняемость. Слой пыли, накопившейся в фильтре, имеет большую площадь поверхности, подвергаемую воздействию воздушного потока, проходящего через фильтр. Пылевые частицы в слое могут воспламеняться значительно легче, чем при обычных испытаниях, хотя некоторые материалы, легко окисляющиеся, могут полностью окислиться в воздушном потоке до поступления в фильтры (рис. 2.12).

Большинство опубликованных данных о воспламеняемости пылей относится к взрывам пыли в воздухе [36]. Аэродисперсные системы аналогично взрывоопасным смесям газов характеризуются предельными значениями концентрации и температуры, ниже которых воспламенения не происходит. Для большинства воспламеня-

ющихся промышленных пылей нижний предел концентрации составляет 20—40 *г/м³*. Это чрезвычайно высокая концентрация, и в системах высокоэффективной фильтрации такие условия непосредственно перед фильтрами не должны быть. Если же в технологических процессах такие концентрации пыли могут образоваться, то необходимо у мест их возникновения установить пылеуловители

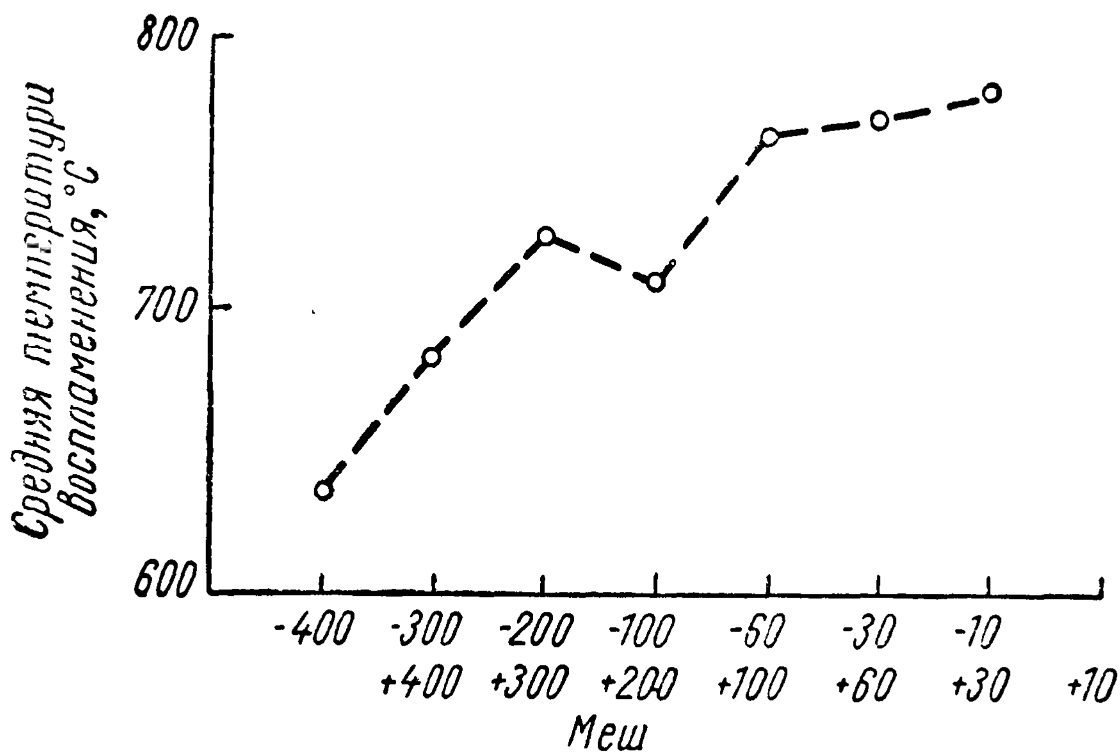


Рис. 2.12. Влияние размера частиц на температуру воспламенения бериллия.

(циклоны или скрубберы), чтобы снизить концентрацию пыли перед поступлением воздуха в фильтр. В табл. 2.6 приведены типичные значения температуры воспламенения для некоторых технологических пылей.

Таблица 2.6

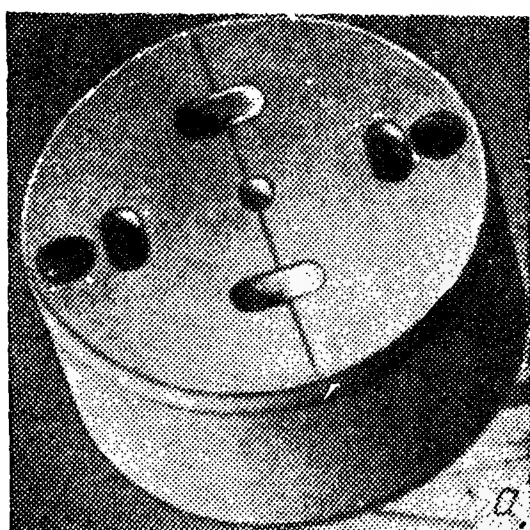
Температура воспламенения некоторых технологических пылей

Технологическая пыль	Температура воспламенения, °С	Технологическая пыль	Температура воспламенения, °С
Уголь	610	Сера	260
Зерновой крахмал	470	Порошок урана	Комнатная температура
Алюминий	645		
Магний	520	Гидрид урана	То же
Ацетатцеллюлоза	· 420	Порошок циркония	»
		Порошок плутония	»

Оценка воспламеняемости, более подходящая для условий, наблюдающихся в фильтрах, может быть сделана двумя методами: путем определения температуры, при которой наблюдается скачок в скорости увеличения температуры при непрерывном медленном нагреве материала, или путем определения скорости увеличения температуры при заданной температуре. Ниже приведены примеры таких оценок.

Испытания дифференциальным термоанализатором

Образец испытуемого порошка помещают в отверстие блока Синданио диаметром 6,37 *мм* и глубиной 6,37 *мм*. Такое же количество негорючего материала помещают в соседнее отверстие. Разница в температурах между двумя образцами измеряется соединенными с ними термопарами. Абсолютная температура материала в испытаниях измеряется третьей термопарой. Блок Синданио затем помещают в печь, температура которой в течение 2 *ч* поднимается до 1 000° С.



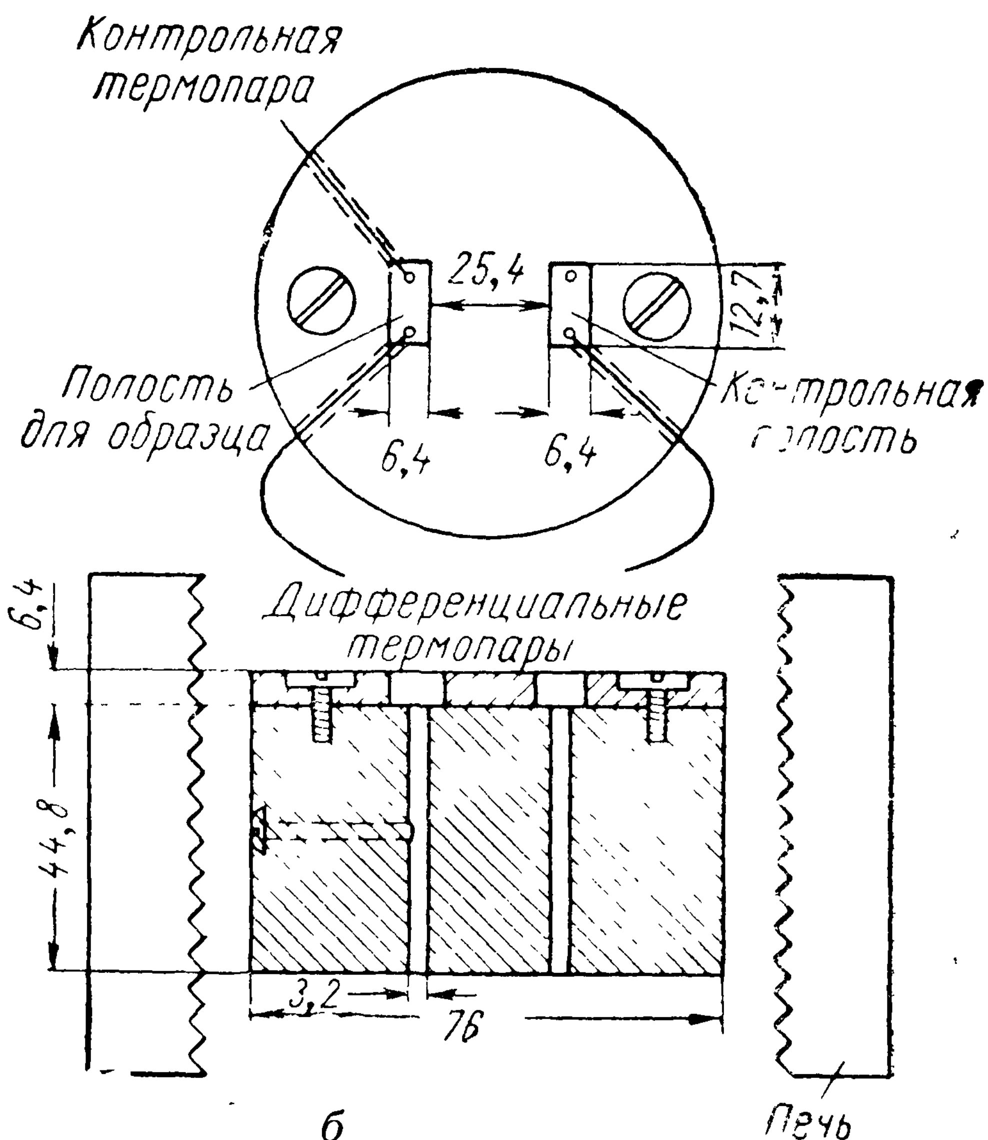


Рис. 2.13. Общий вид (*а*) и схема (*б*) устройства для проведения дифференциального термоанализа на воспламеняемость.

За температуру воспламенения принимается температура, показываемая третьей термопарой, когда увеличение температуры испытуемого образца выше температуры холостой пробы. Повышение температуры в течение периода воспламенения является определенной мерой теплоты реакции (табл. 2.7). На рис. 2.13 приведена схема опыта.

Таблица 2.7

Температура воспламенения некоторых материалов

Материал	По дифференциальному термоанализатору, °С	По Вилеру, °С
Сахар (200 меш)	530	540
Растворимый крахмал (200 меш) . .	540	630—640
Активированный уголь (массивный)	360—445	430
Дубовые опилки (200 меш)	310	635

Испытание на саморазогревание

Одной из причин возгорания является саморазогрев, при котором внутри системы возникает тепла больше, чем из нее отводится. Если тепло остается в системе, то скорость реакции увеличивается, и тепловыделение происходит быстрее. При таких испытаниях 1 *г* образца помещают в испытательную трубку с термопарой, а испытательную трубку — в сосуд Дьюара, а затем в ванну, термостатированную при температуре 80° С. Температура отмечается в течение 4 *ч* и любое ее повышение фиксируется.

Такие испытания особенно пригодны для смешанных пылей, когда составляющие инградиенты могут оказаться несовместимыми.

Влияние пылевидных примесей

Рассматривая воспламеняемость пылевидных материалов, необходимо помнить, что помимо основных технологических частиц в воздушном потоке содержатся частицы посторонних материалов, которые самым различным образом могут влиять на способность осадка к воспламенению, так как: 1) частицы других материалов могут быть более горючими, чем основная пыль; 2) разбавление относительно инертной пылью может уменьшить воспламеняемость основной технологической пыли; 3) может наблюдаться явление несовместимости основной технологической пыли с примесными частицами или с фильтрующим материалом.

Любые органические частицы, уловленные фильтром, при попадании на них огня могут загореться при низкой температуре, выделяя при этом такое количество тепла, которое достаточно для нагрева частиц технологической пыли выше температуры воспламенения. В табл. 2.8 приведены результаты исследований воспламеняемости

Таблица 2.8

Воспламеняемость различных пылей

Место отбора пробы	Природа пыли	Температура воспламенения, °С	Температурный скачок, °С
С операций отливок;	Порошок, 1—2% Be, Mg, Al и инертная пыль	630—900	10—25
Физические лаборатории	Волокнистый материал, до 50% органических веществ, около 1% Be, остальное — инертная пыль	120—220	110—175
Главный газоход к фильтрам	В основном инертная пыль и немного Be (1%)	700—950	15—50
Стекловолокнистый предфильтр	В основном инертная пыль, немного Be (1%) и фильтрующий материал	Не воспламеняется до 950 (стекловолокно расплавилось при 700)	—
Хлопко-асбестовый конечный фильтр	То же	240 (воспламенение фильтрующего материала)	—

пылей, образцы которых были отобраны из различных точек фильтрующей установки в цехах по переработке бериллия. Определения проводили с помощью дифференциального термоанализатора.

При оценке воспламеняемости пылей надо иметь в виду эти основные положения. В тех случаях, когда это имеет большое практическое значение, испытания на воспламеняемость следует проводить на реальных смесях пылей вместе с фильтрующим материалом.

Практически желательно не только знать температуру воспламенения и горючие свойства технологических пылей и пылей, поступающих непосредственно в фильтры, но очень важно также перед выбором типа фильтра и способа установки провести оценку влияния возгорания пыли на фильтр.

ПРОБООТБОР И ИЗМЕРЕНИЯ

Методы пробоотбора и дисперсного анализа аэрозолей довольно хорошо изучены и детально описаны [3, 37, 38]. Мы рассмотрим только некоторые основные вопросы и отдельные типы приборов.

Основной целью пробоотбора и дисперсного анализа является получение необходимой информации об аэрозолях, образующихся в промышленных или лабораторных условиях. Это позволяет установить степень опасности для людей в случае выброса аэрозолей в атмосферу и определить требуемую эффективность системы фильтрации и тип фильтров. Пробоотбор можно проводить не только для определения концентрации образца пыли, но также и для тщательного изучения состава и свойств частиц, включая их кристаллическую структуру, гигроскопичность, химический состав и т. д. Во всех случаях пробоотбора должны выполняться определенные основные требования: пробоотборные устройства должны отбирать представительные пробы, отвечающие поставленным задачам отбора и специфическим условиям системы, т. е. в зависимости от свойств аэрозолей, оказывающих влияние на процесс улавливания. Проба должна быть получена в подходящей форме, позволяющей, например, осуществить дисперсный анализ, изучить вещественный состав частиц. Однако необходимо заметить, что простая система пробоотбора, обычно применяемая для текущего технологического контроля, хотя и дает возможность получать представительные пробы, является относительно несовершенной, так как позволяет получать образцы только для определения общего количества.

Работа пробоотборных устройств основана на действии одного или нескольких механизмов улавливания частиц. Наиболее часто используются фильтрация, инерционное осаждение, термопреципитация, электростатическое осаждение и седиментация.

Простейшим улавливающим устройством является фильтр, который должен быть высокоэффективным и давать пробу в удобном для анализа виде. В качестве наиболее подходящей фильтрующей среды для этих целей используются молекулярные мембранные фильтры, обладающие почти 100%-ной эффективностью улавлива-

ния частиц размером более 0,01 *мкм* и улавливающие основную массу частиц на поверхности фильтра или на незначительной глубине от нее. Фильтрующий материал изготовлен из эфиров целлюлозы, растворимых в ацетоне, что позволяет собирать частицы на поверхности прозрачной пленки для их дальнейшего изучения. Такие фильтры следует включать в качестве последней ступени во все пробоотборные системы, чтобы контролировать их эффективность. Более детально такие фильтры обсуждаются в гл. IV.

Влияние формы частиц

Физические процессы, на которых основано осаждение частиц и их измерение, в большинстве своем разработаны для сферических частиц. Теоретические представления могут быть распространены на частицы, имеющие форму, например, пластинок или эллипсоидов, однако это не решает проблемы. Так, например, стационарные скорости оседания частиц различной правильной формы были теоретически изучены Девисом [39], но применить его данные для реальных аэрозолей трудно. Дело в том, что частицы чаще всего имеют неправильную форму, поэтому основная задача — определить их размер.

Наиболее простым путем определения «диаметра» частиц является сравнение площади их проекции с кружками известного размера в поле зрения микроскопа. Частицы затем группируются в серии по размерам. Однако для такой частицы имеется также эквивалентный диаметр, соответствующий ее объему, существуют и другие условные диаметры, соответствующие поведению частиц в специфических условиях.

Маленькая сферическая частица при падении в спокойном воздухе будет приобретать стационарную скорость, определяемую уравнением $V = 0{,}003\ \rho d^2$ *см/сек* (закон Стокса), где ρ — плотность частицы, *г/см*^{3}; d — ее диаметр, *мкм*. Частица неправильной формы, падающая с той же скоростью, может быть определена тем же эквивалентным диаметром d, который, вообще, не будет равен диаметру, вычисленному по площади проекции или по объему частицы. Поэтому, когда сравниваются результаты различных методов осаждения и измерений, необходимо вводить поправочный коэффициент формы. Во многих случаях форма частиц не имеет существенного значения, но при проведении исследований важно помнить, к какому методу измерений относятся принятые размеры.

Агрегация частиц

Во многих аэрозолях частицы представляют собой конгломераты, образованные из очень мелких частичек, одинаковых или различных по составу. Изучать такие системы очень трудно: даже в случае одинаковых по составу частичек возникают трудности, связанные с их аномальной плотностью. Кроме того, такие частицы могут раз-

рушаться или, наоборот, расти за счет дальнейшей агрегации. На практике часто наиболее полезным оказывается определение только общего веса токсических веществ или других интересующих нас материалов.

Изокинетичность пробоотбора

В большинстве случаев воздух или газы находятся в движении, поэтому необходимо рассмотреть взаимодействие между газообразной окружающей средой, из которой производится отбор, и пробоотборным устройством. Инерционность частицы определяет расстояние, на котором она следует за движением газа. Кроме того, частицы непрерывно оседают под действием силы тяжести и продолжительность их пребывания во взвешенном состоянии зависит от характера движения газа. Уолтон [40] считает, что любые течения воздуха в облаке седиментирующих безынерционных частиц с равномерной начальной концентрацией не могут изменить эту концентрацию и что число частиц, проходящих через данную площадку, равно числу частиц, которые прошли бы через эту площадку, если бы не было процесса оседания, плюс число частиц, которые прошли бы через нее, если бы не происходило движения среды.

Инерционные эффекты для очень мелких частиц (меньше 5 *мкм*) весьма малы и во многих случаях ими можно пренебречь. Эффект инерции можно проиллюстрировать следующим образом. Если горизонтальную пробоотборную трубку установить в запыленном газовом потоке, то отобранная проба будет содержать пропорционально больше крупных частиц, если скорость потока больше скорости в пробоотборной трубке, и пропорционально меньше, если скорость пробоотбора больше скорости потока. При равенстве этих скоростей отобранная проба дает действительное распределение частиц по размерам, и в этом случае говорят, что система является изокинетичной.

Такое рассмотрение предполагает, что частицы движутся в газе по линиям тока, а роль седиментации незначительна. Если скорость оседания частиц сравнима со скоростью потока, то частицы входят в пробоотборную трубку под углом и оседают в ней. Установлено, что частицы крупнее 30 *мкм* оседают настолько быстро, что их не успевают отобрать таким путем, поэтому рекомендуется осаждать их на специально подготовленную поверхность. Однако с точки зрения опасности вдыхания и фильтрации частицы таких размеров (и крупнее) мало интересуют нас.

Пробоотборные устройства

Кроме способов пробоотбора с помощью фильтров и путем седиментационного осаждения существуют пробоотборные устройства, работающие на основе различных физических процессов (импактор, термопреципитатор, электропреципитатор). Эти устройства успешно

применяются для пробоотбора не только радиоактивных и биологических аэрозолей, но многих обычных пылей и дымов.

Термопреципитатор. При прохождении частиц аэрозоля над нагретой поверхностью они за счет движения газовых молекул удаляются от нее и могут быть собраны на холодной поверхности, расположенной вблизи. Неотъемлемой частью термопреципитатора, разработанного группой английских ученых [3], является канал шириной 0,51 *мм*, образованный двумя осадительными пластинками, вдоль оси которого расположена проволочка, нагреваемая элект-

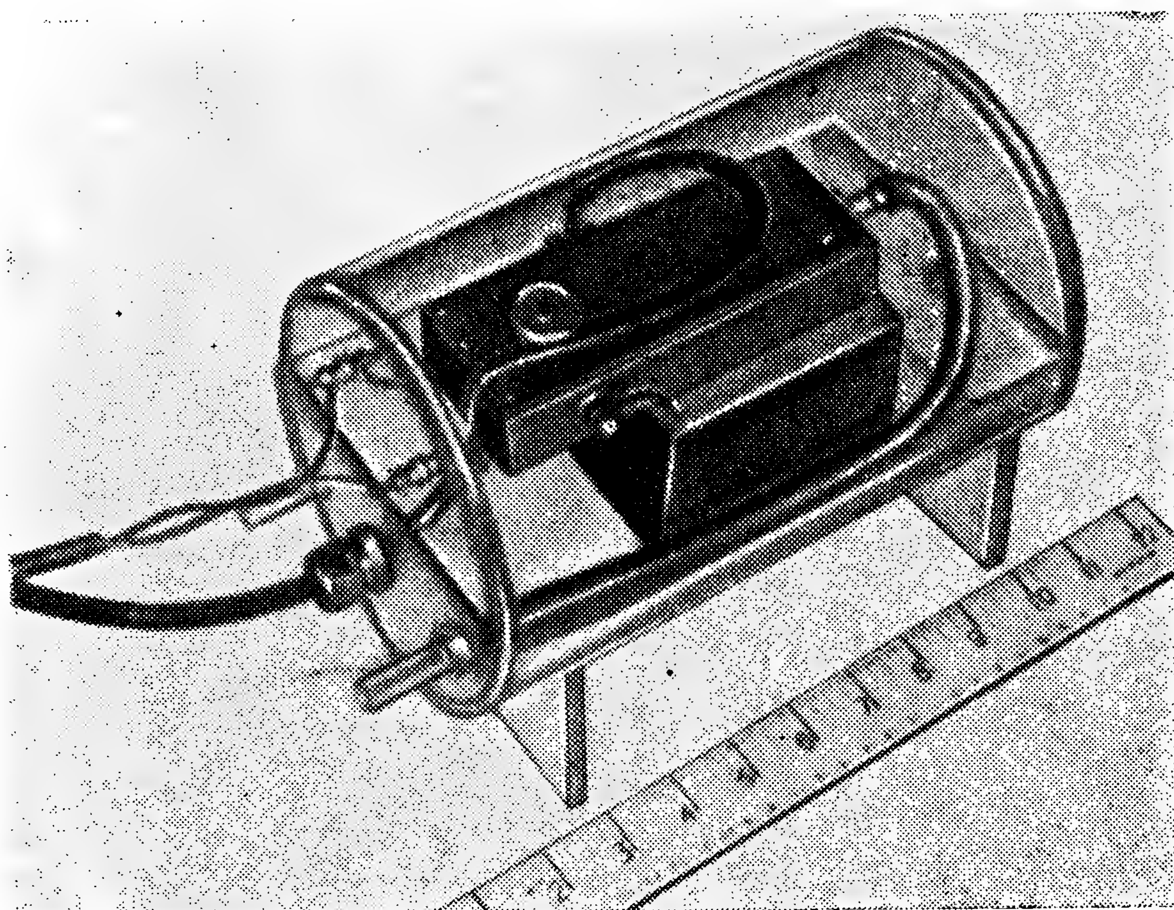


Рис. 2.14. Вибрирующий термопреципитатор.

ричеством до температуры примерно на 100° С выше температуры окружающей среды. Осадительные пластинки, покрытые стеклами, охлаждаются за счет значительной массы металлического корпуса. На каждой пластинке собирается осадок пыли длиной около 9 *мм* и шириной до 1 *мм*. Строгого распределения частиц по размерам не наблюдается, поэтому анализируются оба осадка. Нормальная скорость газа 7 $см^3/мин$, при этой скорости полностью осаждаются частицы размером меньше 5 *мкм*. Более крупные частицы не отбираются с помощью термопреципитатора, так как они обычно седиментируют до пластинок.

Осадительные пластинки можно приспособить для улавливания частиц непосредственно на сетку для последующего анализа в электронном микроскопе (однако более удобен последующий перенос частиц на подходящую пленку и затем на сетку). На рис. 2.14 показан один из последних вариантов термопреципитатора, в котором пластинки совершают колебательные движения, что позволяет увеличить отбираемую пробу и продлить время пробоотбора.

Каскадные импакторы. Во всех каскадных импакторах используется инерционное осаждение частиц, возникающее при резком

повороте газового потока. При определенных условиях частица не может следовать по линиям тока, смещается с них и ударяется об осадительную пластинку, поверхность которой покрыта тонкой липкой пленкой для удержания частиц и предотвращения их уноса и разрушения. Первый прибор, успешно использующий этот принцип, был разработан Меем [41, 42]. Он состоял из четырех осадительных ступеней, которые позволяли путем соответствующей калибровки непосредственно установить распределение частиц по размерам. В качестве пятой ступени дополнительно устанавливается ультрафильтр, что позволяло получить пробу из всех уловленных частиц различных размеров. Было установлено, что частицы крупнее 30 *мкм* не могут быть точно отобраны с помощью каскадного импактора даже с соблюдением принципа изокинетичности.

Процесс осаждения частиц в импакторе теоретически исследовался Меем и позже Девисом и Айлводом [43], а также Ранцем и Уонгом [44]. Все они пришли к выводу, что эффективность инерционного осаждения частиц является функцией безразмерного параметра

$$\psi = \frac{V\rho d^2}{\eta L} K,$$

где V — скорость воздуха на выходе из отверстия в направлении осадительной поверхности; ρ — плотность частиц (сферических и подчиняющихся закону Стокса); η — вязкость воздуха; L — ширина сопла; K — константа. Эффективность осаждения зависит также от расстояния между поверхностью пластинки и срезом сопла, причем отношение этого расстояния к ширине сопла должно быть постоянным для каждой из последующих ступеней импактора [45].

Приведенное соотношение относится только к эффективности осаждения частиц. Детальный анализ или калибровка импактора могут быть проведены только путем счета частиц и их измерения. Кроме того, для основной калибровки желательно использовать сферические частицы. Такие исследования показали [27, 30, 46], что значения медианных весовых диаметров частиц, осажденных на 2, 3-й и 4-й ступенях импактора, достаточно хорошо соответствуют расчетам по выше приведенному соотношению для частиц различной плотности и при различных скоростях воздуха. Таким образом, при стандартных рабочих условиях произведение $\rho V d^2$ является постоянным для каждой ступени импактора. Медианные весовые размеры для более грубых частиц, собранных на первой ступени, зависят от условий пробоотбора и могут быть неточными в отношении частиц больших размеров, если они присутствуют.

Весовое медианное значение для первой ступени должно определяться каждый раз. Весовое медианное значение для конечного фильтра последней ступени в некоторой степени зависит от распределения частиц по размерам. Стюарт предложил значения около 0,4 *мкм* для частиц с плотностью, равной единице, и 0,1 *мкм* — для частиц с плотностью двуокиси плутония. Необходимо иметь в виду,

что импактор более всего подходит для анализа аэрозолей, содержащих частицы в широкой области размеров вплоть до 20 *мкм*. В случае монодисперсных аэрозолей или аэрозолей с частицами меньше 1 *мкм* импактор не годится. Он не дает точного значения распределения размеров частиц, так как они будут осаждаться главным образом на одной ступени, а незначительные количества частиц, собранных на соседних ступенях, не могут быть определены соответствующими медианными весовыми диаметрами.

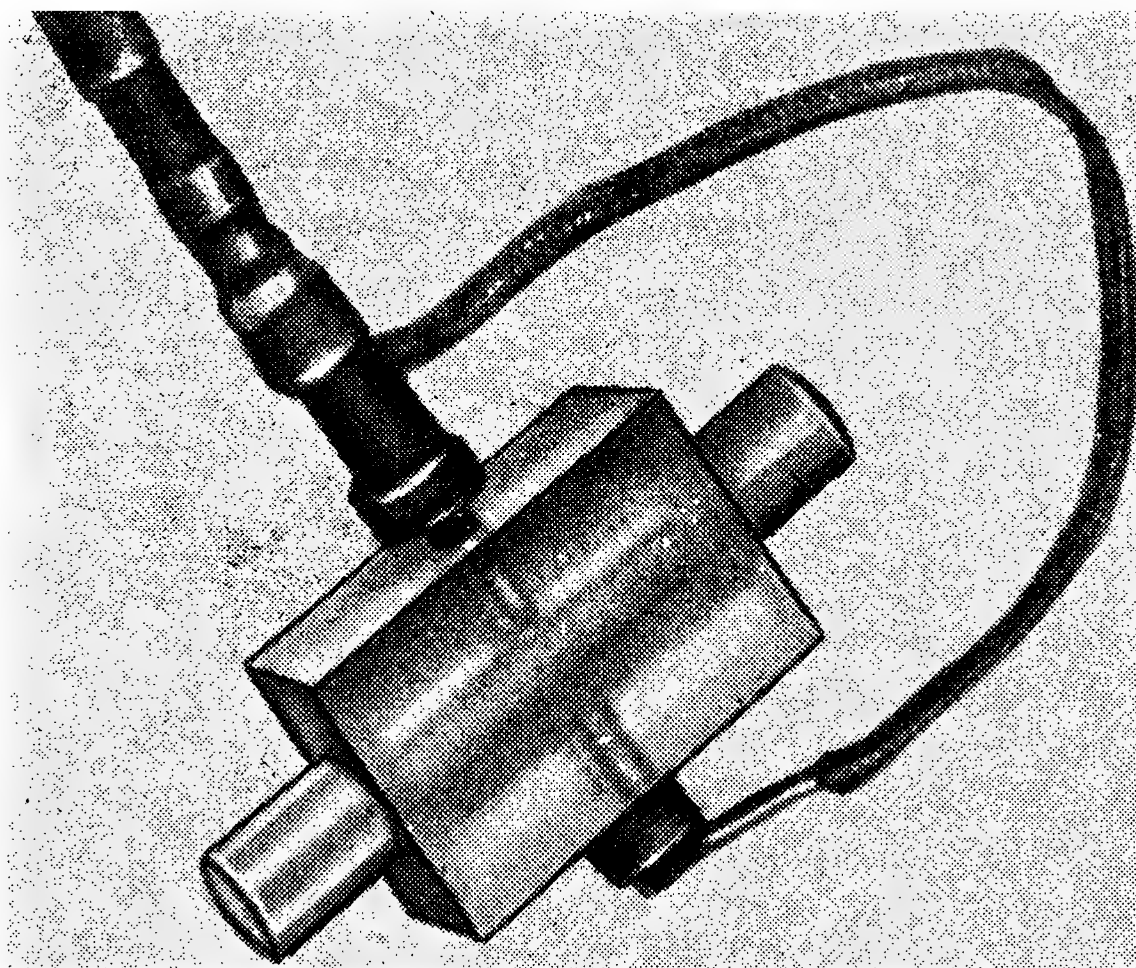


Рис 2.15. Электропреципитатор для пробоотбора.

По данным Стюарта [26] и некоторым неопубликованным сведениям, весовые медианные размеры будут оставаться постоянными, если стандартное геометрическое отклонение больше двух. Мёсер [45] установил, что использование весовых медианных диаметров может привести к ошибочным распределениям размеров, если стандартное геометрическое отклонение меньше двух.

Андерсен [47] использовал многоступенчатый импактор для биологических аэрозолей. Поток в импакторе проходит через маленькие отверстия в пластинке и ударяется о препарированную поверхность чашки Петри. Отверстия в последующих пластинках меньше, но расстояния между поверхностями остаются постоянными. Основным недостатком этой конструкции является турбулентное перемешивание между струями и отраженными от поверхности потоками. В работе [48] описана калибровка этого импактора.

В импакторе, описанном Тейтом [49], воздушный поток выходит из кольцевого цилиндрического сопла, ударяется о соответствующую поверхность, изменяет направление на 180° и проходит через центральный канал. Эта конструкция также не обеспечивает течения газа

по правильным линиям тока, на пластинке ниже выходного потока имеется область с пониженным давлением.

Двухступенчатый пробоотборник был предложен Херрисом и Эйзенбадом [50]. В нем в качестве первой ступени установлен циклон, осаждение частиц в котором должно моделировать улавливание частиц в верхних путях дыхательной системы. Фильтр, установленный в качестве второй ступени, улавливает оставшуюся часть.

Электропреципитатор. Движение заряженных частиц, попавших в электрическое поле, направлено к соответствующему электроду, обычно к заземленному. Основанный на этом принципе прибор, предназначенный для улавливания бактериальных аэрозольных частиц, описан Хаувинком и Ролвинком [51]; Моррис и др. [52] усовершенствовали этот прибор. Основная часть прибора состоит из стеклянной трубки длиной 300 *мм* и диаметром 50 *мм*, в центре проходит электрод (катод). Внутренняя поверхность цилиндра покрыта токопроходящим материалом, который служит другим электродом и осадительной поверхностью. При напряжении 10 *кв* и скорости газа от 10 до 20 *л/мин* эффективность улавливания прибора почти 100%. В варианте Морриса цилиндр может поворачиваться и содержит внутри около 10 *мл* жидкости, т. е. частицы осаждаются непосредственно в жидкость.

Принципиальные преимущества приборов этого типа: эффективное улавливание частиц в широкой области размеров, низкое сопротивление, большая скорость отбора. Прибор, использующий этот принцип, показан на рис. 2.15.

Анализ проб

Наиболее часто требуется определять состав частиц (содержание токсичного компонента в неоднородном материале) и распределение их по размерам, или содержание токсичного материала в частицах различного размера. Состав и количество токсичных материалов могут быть определены химическими анализами или соответствующими физическими методами, а также с помощью специальных приборов в случае биологических материалов. Размеры частиц определяют в основном с помощью оптических и электронномикроскопических приборов. Для сферических частиц известного состава можно также использовать методы, основанные на седиментации и на явлении светорассеяния. Другим свойствам частиц, например их кристаллической структуре и гигроскопичности, уделяют меньше внимания, однако в определенных условиях они могут иметь большое значение.

Оптическая и электронная микроскопия стали стандартными методами анализа и детально описаны в соответствующих руководствах [3, 37]. Стоит только отметить, что для измерения и счета каждого исследуемого образца лучше привлекать нескольких сотрудников, обладающих определенным мастерством и опытом.

Оптический микроскоп. Оптическим микроскопом при использовании объектива с иммерсионным маслом можно обнаружить и измерить частицы размером 0,2 *мкм*; без масляной иммерсии — до 0,5 *мкм*. Имеется несколько видов окулярных счетно-измерительных сеток, состоящих в основном из серий кружков и параллельных линий, что позволяет значительно облегчить сортировку частиц по функциям. Градация размеров пропорциональна $\sqrt{2}$, что позволяет упростить переход от одного увеличения к другому и облегчить определение размеров. Соответствующей регулировкой микроскопа можно добиться, чтобы размеры выбранных фракций при различных увеличениях перекрывались таким образом, чтобы значения счета для частиц всех размеров можно было сразу суммировать.

Для получения удовлетворительных результатов при измерении и счете частиц неправильной формы должна быть принята специальная методика. Наиболее предпочтительным является метод подбора (подгонки) частиц по площади их проекции к кружкам в сетке и определении двух кружков, один из которых больше, а другой меньше площади проекции частицы. Для более мелких частиц следует делать поправку, учитывающую наличие дифракционных колец вокруг изображения частиц.

Для частиц в виде игл или пластинок, а также для конгломератов в виде цепочек проводится специальное детальное исследование, так как вышеизложенный метод к ним не применим.

Электронный микроскоп. Электронный микроскоп применяется для измерения субмикронных частиц, размеры которых лежат за пределами разрешающей способности оптического микроскопа. При использовании обоих микроскопов очень важно, чтобы области измерений перекрывались, т. е. измерения электронным микроскопом должны охватывать частицы размером до 3—5 *мкм*. Результаты измерений при совмещении необходимо тщательно оценить, так как число частиц в пробах, которые измеряются и обсчитываются в общих диапазонах размеров обоими микроскопами, может значительно расходиться, что вызовет необходимость введения больших коэффициентов перехода. Если распределение частиц относится к широкой области размеров, то совмещение двух серий измерений лучше проводить на частицах размером около 1 *мкм*.

Техника препарирования для измерения в электронном микроскопе детально описана Комосом [53]. Проба частиц улавливается мембранным фильтром. Частицы с выбранной маленькой площади переносятся на специальную сеточку электронного микроскопа, предварительно покрытую прочной пленкой, полученной способом вылавливания из ванночки и покрытой углеродом с последующим растворением эфира целлюлозы в ацетоне. Взятые для анализа площадки мембранного фильтра нарезаются кусочками, немного меньшими, чем сетка-держатель. Для приготовления серии образцов требуется около 8 *ч*. Необходимо принять меры предосторожности, чтобы не допустить осаждения посторонних пылинок на образцы.

Процессы растворения и подготовки микроскопа должны осуществляться в возможно короткое время, чтобы не допустить потерь частиц. Если никакой потери видимых частиц не происходит, полагают, что более мелкие частицы не теряются. Частицы диаметром менее 0,01 *мкм* легко обнаруживаются и измеряются.

В США в научно-исследовательском центре по разработке атомного оружия разработан новый метод препарирования частиц применительно к другим пробоотборным устройствам. Так, например, в случае импактора Мея на пробоотборные стекла наносят снимающуюся, растворимую в ацетоне пленку, которую покрывают липким слоем для улавливания частиц. Частицы переносятся на углеродную пленку по способу, описанному Комосом. По другому методу, разработанному в этой же лаборатории, углеродную пленку наносят на ту сторону мембранного фильтра, на которую осаждаются частицы, затем фильтр растворяется в парах кипящего ацетона в течение 3—5 *мин.* Хотя при этом образуется реплика поверхности фильтра, полагают, что она не мешает, если углеродная пленка имеет достаточную толщину. Этот метод был успешно использован для измерения аэрозольных частиц хлористого натрия размером менее 0,1 *мкм.* Однако при этом происходили некоторые потери более мелких частиц, так как на пленке-реплике были обнаружены пустые ячейки в виде куба.

Причины этих изъянов пока еще не ясны; возможно, что они объясняются незначительной растворимостью. Этот быстрый метод имеет преимущества перед более длительным методом Комоса в тех случаях, когда влияние растворимости незначительно.

Автоматические методы счета и измерения частиц. В последнее десятилетие много внимания уделяется разработке автоматических методов классификации размеров частиц, так как обычные методы весьма трудоемки [54—56].

Автоматические методы зависят в основном от способности фотоэлементов быстро реагировать на изменения интенсивности света, поэтому необходимо использовать очень высокоскоростные счетные электронные системы. Система требует применения устройств для сканирования поля частиц световым лучом, фотоэлектрического детектора, дискриминаторного устройства и счетчика. Эти приборы можно использовать для изучения частиц, находящихся на микроскопных предметных стеклах, либо для работы с 35-миллиметровой фотопленкой. Наименьший размер частиц, который непосредственно может быть измерен, равен 1 *мкм* или несколько больше. В случае микрофотографий развертывающее устройство для пленки может считать в пятне диаметром менее 0,2 *мм*. Скорость счета весьма высокая, время для просмотра на предметном микроскопическом стекле частиц в определенном интервале размеров около 8 *сек* (рис. 2.16). Этот прибор имеет первостепенное значение, когда необходимо просчитывать очень много текущих проб и получать кривые распределения частиц по счету. Никаких деталей о строении частиц получить нельзя.

Авторадиография. Авторадиография применима для исследования радиоактивных частиц с α- или β-излучением. С ее помощью можно определить эквивалентный диаметр частиц (принимая их за сферы) в том случае, если известен их вещественный состав. Метод, описанный Лири [57], пригоден для определения частиц

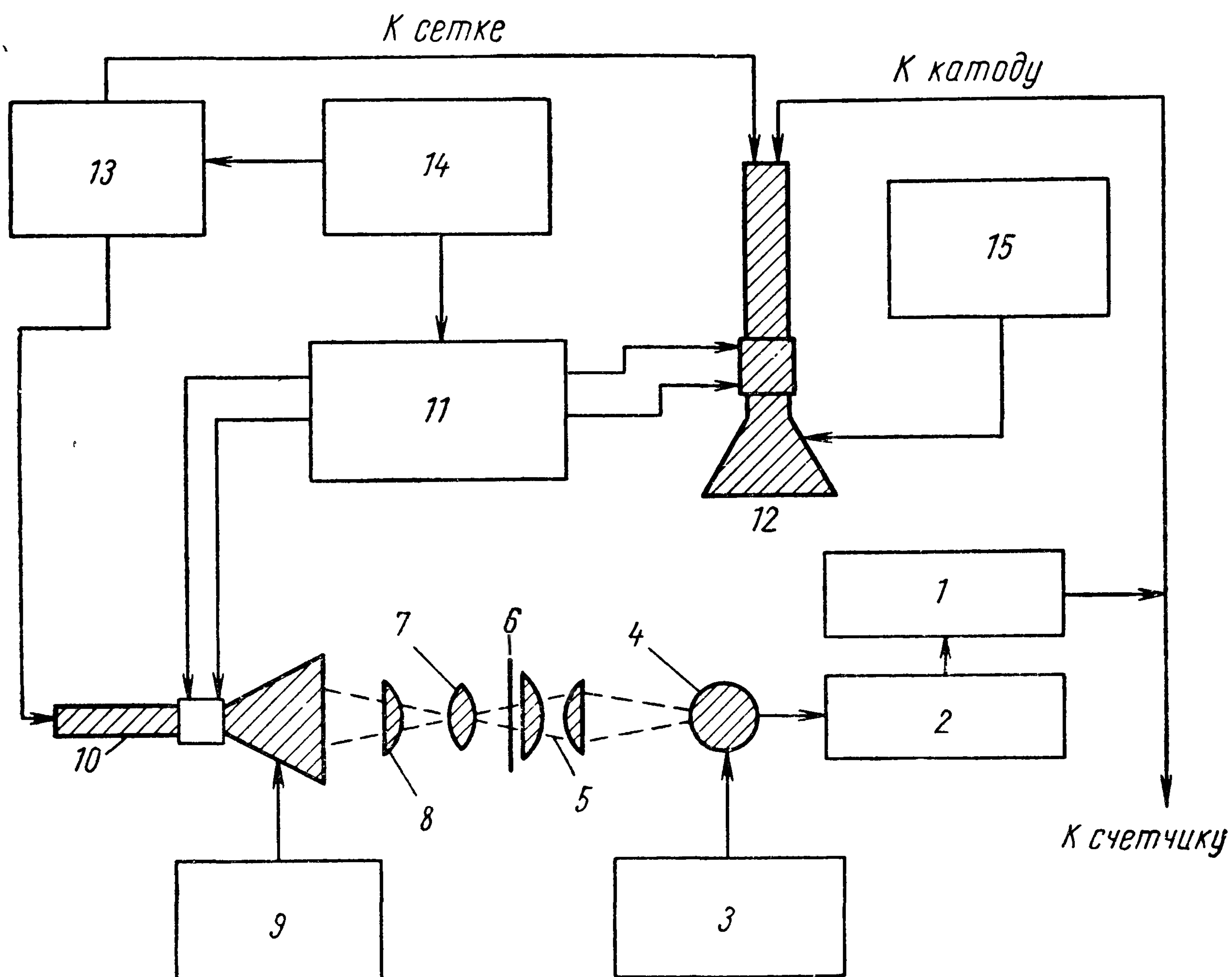


Рис. 2.16. Блок-схема микроскопа с бегущим пятном для счета частиц на микрофотографиях:

1 — усилитель; *2* — стабилизирующий контур; *3* — питание фотоэлемента током высокого напряжения; *4* — фотоэлемент; *5* — конденсер; *6* — предметное стекло; *7* — объектив; *8* — окуляр; *9* — питание развертывающего устройства током высокого напряжения; *10* — развертывающая трубка; *11* — развертывающее устройство и усилитель; *12* — управляющее устройство; *13* — запирающий усилитель; *14* — синхронизирующий генератор; *15* — питание трубки управляющего устройства током высокого напряжения.

с α-излучателями, при этом их масса определяется по числу треков в фотоэмульсии за определенное время экспозиции. Зависимость между диаметром частицы d в микрометрах, числом треков c и временем экспозиции t в минутах определяется соотношением

$$d = \left(\frac{kc}{t}\right)^{1/3},$$

где

$$k = 6{,}32 \cdot 10^{-12} \left(\frac{M}{\lambda \rho f}\right);$$

M — молекулярный вес; λ — постоянная распада, *мин*; ρ — плотность материала, *г/см*^{3}; t — число радиоактивных атомов в молекуле соединения.

В этих соотношениях принято, что в виде треков наблюдается половина излучающихся α-частиц. (При исследовании частиц полония использовали этот вид анализа, но допускали, что в треках зарегистрирована только 1/3 α-излучения. В результате этого величина α была завышена в $\sqrt[3]{1,5}$ раза.) Этот метод можно применять только для очень мелких частиц, для которых самопоглощение α-частиц может быть небольшим. Размер частиц, при котором поправка на самопоглощение становится существенной, зависит

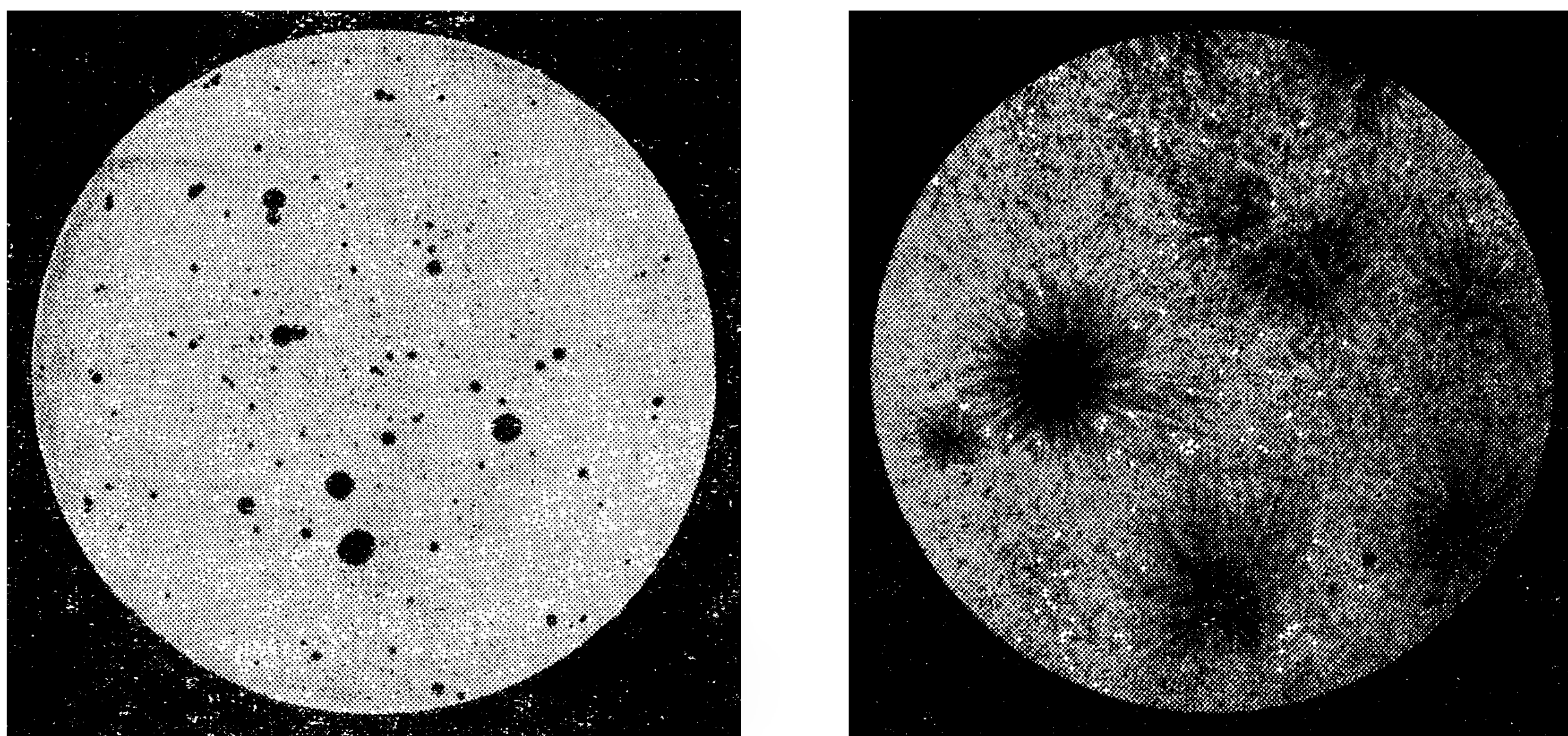


Рис. 2.17. Два типа авторадиографий частиц PuO_2.

от эффективного атомного номера присутствующих атомов. Для плутония и урана в виде окислов поправка становится заметной для частиц диаметром около 20 *мкм*.

Кауен [58] сообщил о более простом методе, в основе которого лежит образование видимого пятна. Путем предварительной калибровки можно определить, что все частицы, содержащие больше некоторого точно установленного количества α-излучателя, будут давать видимые пятна, появляющиеся в течение определенного времени экспозиции. Меняя время экспозиции таким путем, можно получить общую зависимость числа частиц от их размера. Экспериментальный метод, особенно технические средства, применяемые для оценки видимых пятен, должны давать совершенно определенные результаты и строго контролироваться. Проверка данных может быть произведена путем анализа контрольных проб соответствующего радиоактивного элемента.

В третьем методе применяется устройство для напыления активного материала, осаждающегося на соответствующей поверхности покрытой сцинтиллирующим порошком, например сульфидом цинка. Видимые световые вспышки регистрируются на фотопленку. Этот многообещающий метод находится пока в стадии доработки. На рис. 2.17 показаны авторадиографии частиц PuO_2.

Статистика распределения размеров. Статистические методы, применяемые для оценки распределения частиц по размерам, были исследованы Херденом [59]. Коттлер [60], рассмотрев способы образования аэрозолей за счет процессов роста и механического диспергирования, предположил, что логарифмически нормальное распределение встречается наиболее часто. В пользу этого предположения свидетельствовал большой экспериментальный материал: во всех процессах образования, состоящих из элементарных актов, протекающих случайно и беспорядочно во времени, наблюдалось логарифмически нормальное распределение. Когда аэрозоль создается с помощью специально сконструированных устройств (например, распылением жидкости с получением капель, размер которых почти не изменяется во времени), то распределение по размерам следует нормальному распределению Гаусса относительно наиболее вероятного размера. Необходимо помнить, что распределение размеров аэрозольных частиц может изменяться во времени в результате осаждения более крупных частиц, за счет агрегации мелких частиц или их укрупнения при адсорбции и конденсации паров воды.

Очень удобно для построения кривой распределения размеров использовать логарифмически нормальную вероятностную сетку; по оси ординат откладывается размер частиц (в логарифмическом масштабе), а по оси абсцисс — суммарный вес или суммарное число частиц. По построенной кривой легко определить счетные или весовые медианные размеры и долю веществ, относящихся к области размеров, опасных для вдыхания. Используя зависимость осаждения частиц от их размера, можно легко оценить количество пыли, задерживающейся в легких и во всей дыхательной системе. Если зависимость, построенная таким образом, будет изображаться прямой линией, то распределение является логарифмически нормальным и геометрическое стандартное отклонение будет равно

$$\sigma = \frac{\text{Размер, соответствующий 84,13\% на кумулятивной кривой}}{\text{Медианный размер}} =$$

$$= \frac{\text{Медианный размер}}{\text{Размер, соответствующий 15,87\% на кумулятивной кривой}}.$$

Величина σ определяет область размеров частиц, участвующих в распределении. Для монодисперсных аэрозолей $\sigma = 1$, а для полидисперсных аэрозолей, основная масса частиц которых имеет размеры от 0,1 до 10 *мкм* и выше, величина σ может быть 10 и больше. Осадок пыли и ее концентрация в воздухе, образующаяся в результате действия ветра, связаны с весовым медианным размером и геометрическим стандартным отклонением первоначального аэрозоля, а также с плотностью частиц. Хотя и допускается, что для атмосферного аэрозоля характерно нормально логарифмическое распределение, это соотношение не может быть описано аналитически.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibbs W. Clouds and Smoke, N.Y., Blakiston, 1924.
2. Hazen A. Trans. Amer. Soc. Civil Engrs, **77**, 1539 (1914).
3. Green H., Lane W. Particulate Clouds, Dusts, Smokes and Mists, 1957. Lond. Spon.
4. Friedlander S. et al. Handbook on Air Cleaning, 1952. Washington, USAEC.
5. Drinker P. et al. J. Industr. Hyg., **8**, 307 (1926).
6. Amer. Soc. Heat. Vent. Engrs, **37**, 75 (1959).
7. Moyerman R., Shuler K. Science, **118**, 612 (1953).
8. Tabor E., Warren W. Arch. Industr. Health, **17**, 145 (1958).
9. Meetham A. Atmospheric Pollution, its Origins and Prevention, 1956. Oxford, Pergamon Press.
10. Atmospheric Pollution in Leicester, 1956, DSIR, HMSO.
11. Bryan A., Bryan C. Principles and Practice of Bacteriology, 1947. N.Y. Barnes and Noble.
12. Stern A. (Ed.) Air Pollution, **2** (1962), N.Y., Academic Press.
13. Penney, Sir William. Brit. J. Radiol., **35**, 510 (1962).
14. Stannard J. Prog. Nucl. Energy, Ser. IV, **2**.
15. Rutherford E. et al. Radiations from Radioactive Substances. 1930. Cambridge Univ. Press.
16. Meyer S., Schweidler E. Radioactivitat, 1927.
17. Lorenz E. Nat. Cancer Inst., **5**, 1 (1944).
18. Hultqvist B. Kgl. svenska vetenskapsakad. handl, 1956.
19. Atmospheric Radioactivity at Washington, DCUSNRL Rep. P106282.
20. Wilkening M. Rev. Scient. Instrum., **23**, 13 (1952).
21. Megaw W. et al. J. Nucl. Energy (Parts A and B), **15**, 176 (1961).
22. Megaw W., Bridges J. Nature, Lond., **195**, 448 (1962).
23. Hillard R., Reid D. Hanford Rep. HW 72321.
24. Hilliard R. et al. Health Phys., **5**, 212 (1961).
25. Parker G. et al. Fuel Element Catastrophe Studies: Hazards of Fission Product Release from Irradiated Uranium. ORNL 60-6-24.
26. Stewart K. Trans. Faraday Soc., **53**, 161 (1956).
27. Voegtlin E., Hodge H. Pharmacology and Toxicology of Uranium Compounds, 1949, N.Y., McGraw-Hill.
28. Hyatt E. et al. J. Industr. Hyg., 99 (1959).
29. Moss W. et al. Health Phys., **5**, 212 (1961).
30. Stewart K. Prog. Nucl. Energy, Ser. IV, **5** (1963). Lond., Pergamon.
31. Sutton O. Micrometeorology, 1953, N.Y., McGraw-Hill.
32. Pasquill F. Atmospheric Diffusion, 1962. N.Y., Van Nostrand.
33. Accident at Windscale No. 1 Pile on 10th October 1957. Commd. 302 HMSO.
34. Chamberlain A. Quart. J. Roy Meteorol. Soc., **85**, 350 (1959).
35. Engel O. J. Res. Nat. Bur. Standards, **60**, 245 (1958).
36. Mann F. Electr. Times, 1957, Lond.
37. Drinker P., Hatch T. Industr. Dust, 1954. N.Y., McGraw-Hill.
38. Yaffe C. et al. Encyclopaedia of Instrumentation for Industrial Hygiene, 1956. Univ. of Michigan.
39. Davies C. Trans. Instn. Chem. Engrs, **25**, 25 (1947). Lond.
40. Walton W. Brit J. Appl. Phys, **5**, 5121 (1954).
41. May K. J. Scient. Instrum., **22**, 187 (1945).
42. Instruction Leaflet No. 3018/R1. Lond., Casella.
43. Davies C., Aylward M. Proc. Phys. Soc., **B64**, 889 (1951).
44. Ranz W., Wong N. Size Distribution of Aerosols Arch. Industr. Health, **5**, 464 (1952).
45. Mercer T. On the Calibration of Cascade Impactors. Lovelace Foundation L. F. 1.
46. Lippman M. Ind. Hyg. Assoc., **20**, 406 (1959).
47. Andersen A. J. Bacteriol., **76**, 471 (1958).
48. Heneveld W. 5th Occupational Health Conf., 1959. Univ. of Texas.

49. Tait G. Chalk River Rep. HP-577.
50. Harris W., Eisenbud. M. Dust Sampler which Stimulates Upper and Lower Lung Deposition. LASL. Rep.
51. Houwink E., Rolwink W. J. Hyg. Camb., **55**, 544 (1957).
52. Morris E. et al. J. Hyg. Camb., **59**, 487 (1961).
53. Kalmus E. I. Appl. Phys., **25**, 87 (1954).
54. Brit. J. Appl. Phys. Suppl. 3, Sections F and G, 1954.
55. Miller L. USNRDL-TR-134 (1956).
56. Morgan B. Research, **10**, 271 (1957).
57. Leary J. Industr. Engng Chem. (Anal.), **23**, 853 (1951).
58. Cowan T. A. Technique for Obtaining Particle Activity and Size Distributions. Sandia Corporation SCR-296.
59. Herdan G. Small Particle Statistics, 1960. Lond. Butterworths.
60. Kottler F. J. Franklin Inst., **250**, 339 (1950).

Глава III

ТЕОРИЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЛОКНИСТЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Многочисленные попытки создания теории фильтрации аэрозолей волокнистыми фильтрами были вызваны необходимостью разработки высокоэффективных противодымных фильтрующих материалов для противогазов, а также возникшими позже потребностями промышленности. В настоящее время основные механизмы улавливания частиц в фильтрующих материалах изучены настолько, что экспериментальные данные по фильтрации в реальных фильтрах находятся лишь в качественном соответствии с теорией, количественная же сторона разработана в меньшей степени. Вместе с тем расчеты на основе уже полученных зависимостей в сочетании с определенным количеством экспериментальных данных могут помочь в предсказании характера изменения эффективности фильтра в зависимости от сложившихся условий эксплуатации.

Волокнистые фильтры обычно состоят из массы тонких волокон, и аэрозольная частица до осаждения проходит извилистый и относительно длинный путь в глубину этой массы. Промежутки между волокнами значительно больше, чем размеры волокон и улавливаемых частиц. Волокнистый фильтр ни в коем случае нельзя отождествлять с ситом в обычном смысле этого слова, иначе бы он быстро забивался и сопротивление потоку воздуха соответственно резко возрастало бы. На рис. 3.1 приведена пористая структура фильтрующего слоя.

Фильтрующие материалы могут изготовляться в виде тонких листов, подобно бумаге, или в виде более рыхлых и толстых объемных слоев; в обоих типах материалов волокна расположены в основном перпендикулярно направлению потока воздуха. Плотность упаковки волокон в фильтрах определяется отношением объема волокон к общему объему фильтра и обычно составляет менее одной десятой. Выбор одного из указанных типов фильтрующих материалов на практике имеет большое значение, но для теоретических рассмотрений это менее важно. Эффективность фильтрации существенно зависит от размера волокон. Во многих высокоэффективных

фильтрах подавляющее большинство волокон имеет радиус менее 2 *мкм*, но в них могут находиться и более грубые волокна, выполняющие роль носителей тонких волокон.

Обычно в теории фильтрации волокнистыми фильтрами рассматривается осаждение частиц на отдельном изолированном цилиндре, расположенном перпендикулярно потоку, причем в основу расчетов эффективности улавливания частиц берется лэмбовское поле течения около поверхности круглого цилиндра. Если бы удалось выполнить эти расчеты с необходимой точностью, то можно было бы определить эффективность фильтра, состоящего из волокон из-

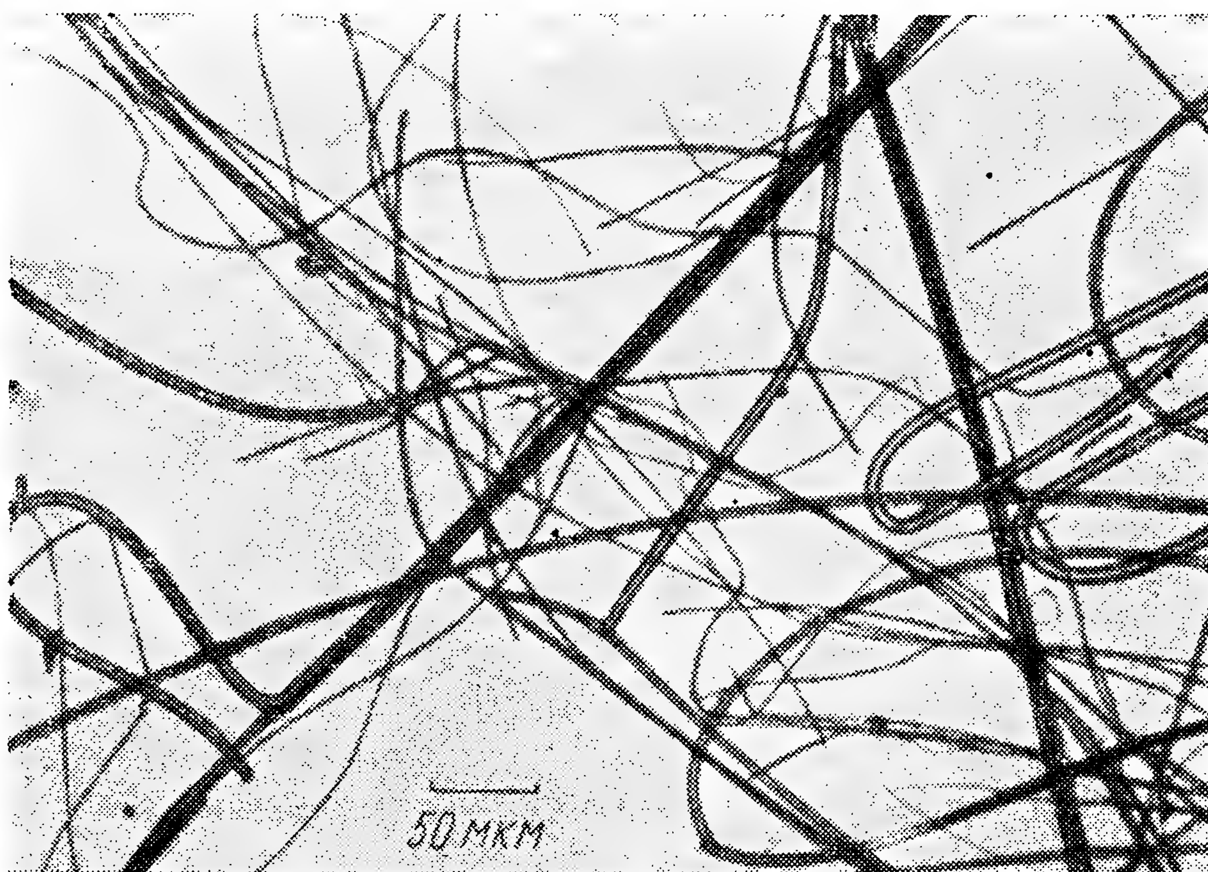


Рис. 3.1. Распределение волокон в стекловолокнистом слое (оптический микроскоп).

вестного диаметра, ориентированных определенным образом и расположенных друг от друга на таком расстоянии, что можно применить математические уравнения, полученные для изолированного волокна. Однако это невозможно осуществить из-за беспорядочного расположения волокон в реальных фильтрах: соседние волокна оказывают взаимное влияние на характер их обтекания, волокна могут касаться друг друга и иметь самые различные размеры, самую разнообразную ориентацию. Поэтому основные усилия были направлены на разработку метода расчета среднего радиуса такого гипотетического волокна в фильтре, который входил бы в математические уравнения, относящиеся к отдельному волокну.

Лобовое сопротивление цилиндра зависит от его радиуса. Для определения усредненного радиуса цилиндра были получены уравнения, основанные на измерениях перепада давления на фильтре. Эти уравнения используются с успехом только в отдельных случаях, так как они содержат поправочные коэффициенты, отличающиеся друг от друга вследствие различия в распределении и ориентации

волокон; эти коэффициенты каждый раз определяют экспериментально. Однако из этого еще не следует, что тот средний радиус волокна, который удовлетворяет уравнениям фильтрации крупных частиц, будет пригоден и для расчета улавливания очень мелких частиц. Несмотря на эти критические замечания, можно получить весьма ценную информацию при изучении эффективности осаждения частиц на одиночных волокнах и при измерениях перепада давления на реальном фильтре в сочетании с исследованиями волокон с помощью обычного или электронного микроскопа.

Прежде чем рассматривать улавливание частиц волокнистыми фильтрами, остановимся на уравнениях для аэродинамического сопротивления фильтров и затем рассмотрим соотношения по захвату частиц одиночным волокном.

При разработке теории фильтрации обычно принимается, что частицы имеют сферическую форму и что все частицы, соприкоснувшиеся с волокнами, прилипают к их поверхности и удерживаются силами Ван дер Ваальса (последнее допущение не всегда оправдывается). К указанным выше неопределенностям следует добавить вероятность наличия зарядов на частицах и возможность их возникновения на волокнах, что приводит к изменению эффективности фильтра. Влияние электрических сил будет рассмотрено далее в этой главе и в гл. IV при описании волокнистого фильтра электростатического типа, состоящего из смеси шерсти и частиц твердых смол, в котором заряженные волокна притягивают аэрозольные частицы.

Система обозначений необходимых величин во многих опубликованных работах весьма произвольна, поэтому иногда трудно проводить сравнение. В нашей книге принята система обозначений, единая для всех цитируемых работ. Мы полагали, что во всех уравнениях в качестве параметров частиц и волокон желательно принимать их радиусы. Значение инерционного параметра K определено в книге так, что его величина в два раза превышает величину, которую американские исследователи обычно обозначают буквой ψ.

МЕХАНИЗМЫ ФИЛЬТРАЦИИ

Улавливание взвешенных частиц из газового потока определяется главным образом действием инерционных сил, броуновской диффузии и прямого зацепления. Для частиц радиусом более 3 *мкм* большое значение может приобрести гравитационное оседание, но в высокоэффективных фильтрах частицы такого (и большего) размера осаждаются благодаря инерции и зацеплению. На улавливание частиц в большей или меньшей степени влияют и другие факторы, некоторые из которых вкратце будут рассмотрены ниже. Скорость воздушного потока в высокоэффективных фильтрах обычно низкая, поэтому детально будет рассмотрено только вязкое обтекание волокон.

Инерция. На рис. 3.2 показаны линии тока вокруг длинного круглого цилиндра, расположенного перпендикулярно направлению потока. Крупная частица, приближающаяся к цилиндру, не следует по линии тока, ее путь более прямой; чем больше масса частицы и выше ее скорость и чем меньше размер препятствия, тем больше ее смещение с линии тока при прочих равных условиях.

Зацепление. Если центр частицы радиусом r_p движется по такой линии тока, которая удалена от поверхности волокна на расстояние, не превышающее r_p, то происходит осаждение данной частицы за счет зацепления или прямого касания. Следовательно, зацепление имеет тем большее значение, чем крупнее частица; оно не зависит от скорости потока, хотя с увеличением скорости меняется характер обтекания волокон.

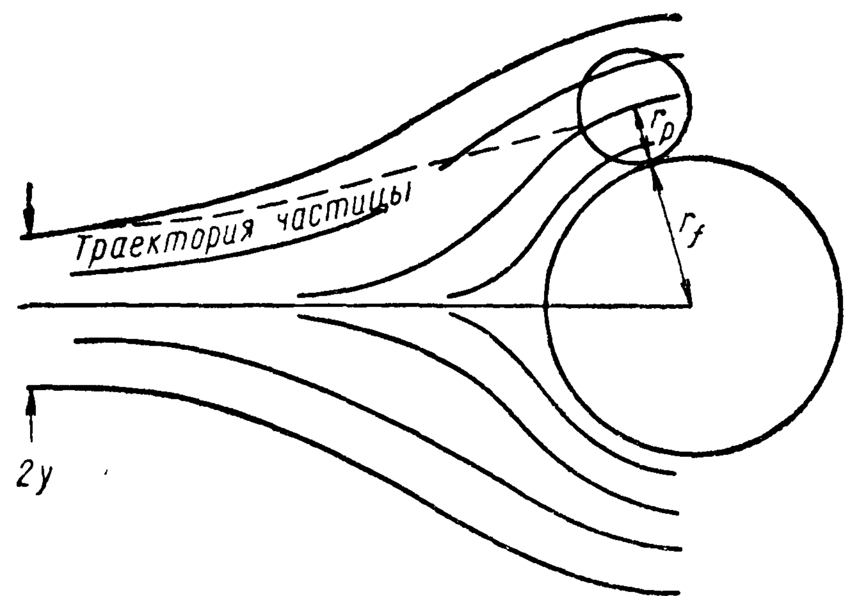


Рис. 3.2. Схема обтекания цилиндра аэрозолем.

Диффузия. Очень мелкие частицы обладают броуновским движением, которое служит причиной их отклонений с линий тока. Чем меньше частица и чем больше время ее прохождения через фильтр, тем больше вероятность значительного отклонения. С увеличением интенсивности броуновского движения возрастает вероятность соприкосновения частицы с волокном.

Интенсивность броуновского движения, или скорость диффузии, частиц радиусом менее 0,15 *мкм* становится настолько значительной, что при определенной скорости фильтрации мелкие частицы улавливаются лучше, чем крупные, т. е. эффективность фильтров повышается с уменьшением размеров частиц. Экспериментально это было показано Фрейндлихом [1]. А так как при увеличении размеров частиц осаждение благодаря инерции и зацеплению возрастает, то, следовательно, существуют частицы определенного размера («максимального проникающего размера») , дающие максимальный проскок через фильтр при определенной скорости фильтрации. За последние несколько лет было проделано много экспериментов для определения частиц максимально проникающего размера при различных скоростях фильтрации и для самых различных фильтрующих материалов. Наглядное представление механизмов фильтрации дано Рамскиллом и Андерсоном [2] (рис. 3.3). Они считали, что влияние инерции начинает сказываться при скорости v_0 и является определяющим при скоростях, превышающих v_m.

На рис. 3.3 осаждение частиц за счет эффекта зацепления представлено горизонтальной линией с постоянным коэффициентом проскока, а за счет диффузии — наклонной прямой линией. Пунктирная

кривая — экспериментальная кривая, которая получается при одновременном влиянии всех трех факторов. Эти кривые весьма упро-

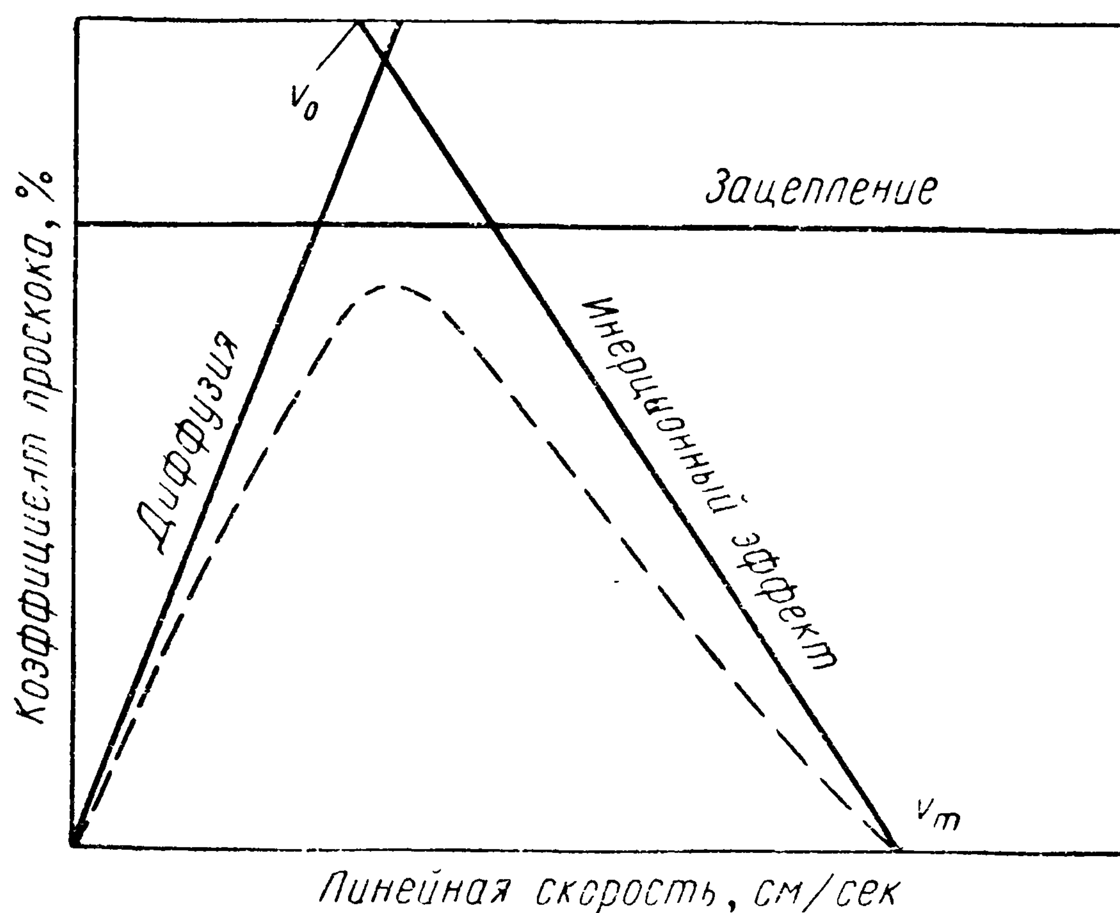


Рис. 3.3. Влияние эффектов инерции, диффузии и зацепления на кривую зависимости коэффициента проскока от скорости [2].

Диффузия: с увеличением r_p, d_f и β кривая перемещается влево. Зацепление: с увеличением r_p кривая перемещается вниз; с увеличением d_f кривая перемещается вверх; с увеличением β кривая перемещается вниз. Инерция: с увеличением r_p кривая перемещается влево; с увеличением плотности частиц кривая перемещается влево; с увеличением d_f кривая перемещается вправо.

щенны, тем не менее они качественно показывают влияние различных механизмов на эффективность фильтров при изменении их характеристик и условий работы.

Перепад давления на волокнистых фильтрах

Измерения перепада давления на фильтрах представляют для нас интерес только как средство для установления радиуса волокон. При исследовании перепада давления на волокнистых фильтрах исходили или из течения через каналы в пористом теле или из лобового сопротивления волокон. Основным уравнением для потока через пористые слои является уравнение Дарси:

$$\Delta P = k_1 \eta b \frac{Q}{A}, \qquad (3.1)$$

где ΔP — перепад давлений на слое; k_1 — константа; η — коэффициент вязкости газа; b — толщина слоя; Q — объемная скорость; A — лобовая площадь фильтра.

Из этого уравнения было выведено хорошо известное соотношение Козени — Кармана для зернистых слоев, которое Селливан и Гертел [3] использовали для волокнистых фильтров:

$$\Delta P = \frac{k_2 \eta Q b S_0^2 (1-c)^2}{k_3 A c^3}, \qquad (3.2)$$

где k_2 — коэффициент формы, одинаковый для всех геометрически подобных каналов; S_0 — удельная поверхность; c — пористость слоя, равная отношению суммарного объема пор к общему объему слоя (пористость c связана со средней плотностью упаковки β равенством $c = 1 - \beta$); k_3 — коэффициент ориентации, равный 1 при потоке, направленном параллельно волокнам, и 0,5 при потоке, направленном перпендикулярно к волокнам.

Селливан и Гертел установили, что k_2 не является постоянной величиной, а изменяется от 4 при $c = 0{,}8$ до 20 при $c = 0{,}98$. Методом анализа размерностей Девис [4] показал, что для чисел Рейнольдса меньше единицы наблюдается следующее соотношение:

$$\frac{4 \Delta P A r_f^2}{\eta Q b} = f(\beta), \qquad (3.3)$$

в котором r_f — средний радиус волокон, а число Рейнольдса определяется как $\frac{2 r_f v_0 \rho}{\eta}$ (v_0 — линейная скорость потока воздуха вдали от волокна; ρ — плотность воздуха).

В результате большого количества экспериментов Девис определил значение функции $f(\beta)$:

$$f(\beta) = 64 \beta^{1,5} (1 + 56\beta^3). \qquad (3.4)$$

Отклонения от этой зависимости малы, если учесть, что Девис использовал самые разнообразные волокнистые материалы и слои с различной плотностью упаковки. Девис установил, что длина отдельных волокон не играет заметной роли, а небольшие разбросы результатов объясняются влиянием их скопления, различной ориентацией и типом волокна. Уравнение для определения перепада давления можно написать в виде

$$\Delta P = \frac{64 \eta Q b \beta^{1,5} (1 + 56\beta^3)}{4 A r_f^2}. \qquad (3.5)$$

Имея необходимые экспериментальные данные, уравнение (3.5) можно использовать для определения среднего эффективного радиуса волокон. Разность между расчетным значением и результатом измерения с помощью микроскопа, как указал Девис, хорошо характеризует степень дисперсии волокон. Девис считает, что, если r_f превышает измеренный радиус, то это происходит вследствие агрегации волокон, если же r_f меньше измеренного радиуса, то,

по всей вероятности, значительная часть волокон расположена параллельно потоку.

Девис установил также, что если плотность упаковки волокон в фильтрах больше 0,02, то средний радиус волокон, определяемый из уравнения (3.5), будет меньше, чем радиус волокон, обеспечивающих наблюдаемую эффективность фильтрации. Он предложил новое уравнение, основанное на опытных данных:

$$r_f^2 = \frac{17{,}5\beta^{1,5}\,\eta v\,(1-\beta)\,b\,(1+52\beta^{1,5})}{\Delta P}. \tag{3.6}$$

Именно это значение r_f^2 следует использовать при расчете эффективности фильтров.

Лэнгмюр [5] также получил выражение для перепада давления, исходя из сопротивления равномерно распределенных цилиндров, расположенных параллельно потоку. Затем в это выражение он ввел коэффициент B, учитывающий тот факт, что в реальном фильтре волокна расположены в основном перпендикулярно к потоку и распределены неравномерно. Коэффициент B изменяется от 0,5 при беспорядочном расположении волокон до 1,5 при более однородном расположении волокон, ориентированных перпендикулярно к потоку. Выражение Лэнгмюра имеет вид

$$\Delta P = \frac{4B\eta\beta\Phi Q b}{A r_f^2}, \tag{3.7}$$

где

$$\Phi = \left(-\ln\beta + 2\beta - \frac{\beta^2}{2} - \frac{3}{2}\right)^{-1}.$$

Другой подход к решению проблемы перепада давления основан на теории лобового сопротивления волокна. Лэмб [6] определил силу лобового сопротивления f_D в расчете на единицу длины изолированного волокна радиусом r_f, расположенного поперек потока, при вязком режиме обтекания ($Re < 1$), который обычно соблюдается в фильтрах:

$$f_D = 8\pi\eta C_L, \tag{3.8}$$

где

$$C_L \approx \frac{v_0}{2(2-\ln Re)}.$$

Если ввести коэффициент лобового сопротивления для изолированного цилиндра $C_D = \frac{8\pi}{Re\,(2-\ln Re)}$, то уравнение (3.8) примет следующий вид:

$$f_D = C_D \rho v^2 r_f. \tag{3.9}$$

Уайт [7] в своих экспериментах по определению установившейся скорости падения проволочек в цилиндрах, наполненных

жидкостями, показал, что наличие стенок увеличивает коэффициент лобового сопротивления. Таким образом, вообще лобовое сопротивление волокна в слое больше, чем лобовое сопротивление изолированного волокна.

Иберапл [8], допуская, что все волокна в равных количествах ориентированы в трех взаимно перпендикулярных направлениях, получил следующее уравнение:

$$\Delta P = \frac{4\eta Qb\,(1-c)}{3Acr_f^2} \cdot \frac{4-\ln Re}{2-\ln Re}. \tag{3.10}$$

Анализ экспериментальных данных с фильтрами из стеклянных волокон показал, что результаты лучше описываются уравнением

$$\Delta P = \frac{2{,}35\eta Qb\,(1-c)}{Acr_f^2}\left(\frac{2{,}4-\ln Re}{2-\ln Re}\right). \tag{3.11}$$

Чен [9] получил уравнение для определения перепада давления в следующем виде:

$$\Delta P = \frac{\beta\rho v^2\, bC_{D\beta}\, r_f}{\pi\,(r_f)_s^2}, \tag{3.12}$$

где $C_{D\beta}$ — коэффициент лобового сопротивления волокна в слое с волокнами средним радиусом r_f и плотностью упаковки β; $(r_f)_s$ — средний радиус волокна, рассчитанный из величины поверхности.

Из работы Уайта следует, что коэффициент сопротивления для волокна в слое равен

$$\frac{C_{D\beta}\,Re}{2} = \frac{k'}{\ln\left(\frac{d_г}{2r_f}\right)}, \tag{3.13}$$

где $d_г$ — расстояние между волокнами радиусом r_f и граничной поверхностью. Считая, что $(d_г/2r_f)$ приблизительно равно $\beta^{-0,5}$, Чен написал это уравнение в следующем виде:

$$\frac{C_{D\beta}\,Re}{2} = \frac{k_3}{\ln\left(k_4\,\beta^{-0,5}\right)}. \tag{3.14}$$

Для этого уравнения k_3 и k_4 необходимо определять экспериментально с волокнистыми слоями различного типа.

Чен измерил перепады давлений на слоях из стеклянных волокон различных диаметров при изменении β от 0,007 до 0,1. Диаметры волокон определялись с помощью электронного микроскопа. Используя уравнение (3.12), он показал, что $\frac{C_{D\beta}Re}{2}$ не зависит от Re в диапазоне от $6\cdot10^{-4}$ до $7\cdot10^{-2}$, а является функцией только β. На основе этого он смог оценить средние значения констант k_3 и k_4 для трех сортов стеклянного волокна, причем оказалось, что

величина поправок очень чувствительна к изменению среднего радиуса волокна.

Чен привел к одинаковому виду уравнения других исследователей и рассчитал по ним значения $C_{D\beta} Re'$ в широком диапазоне изменения β для трех сортов самого мелкого стеклянного волокна $\left(Re'\right.$ — число Рейнольдса для средней скорости потока в слое; $\left. Re' = \frac{Re}{1-\beta}\right)$.

В результате уравнения приняли следующий вид:
уравнение Селливана и Гертела

$$\frac{C_{D\beta} Re'}{2} = \frac{4\pi k_2 \beta}{(1-\beta)^2}; \qquad (3.15)$$

уравнение Девиса (3.5)

$$\frac{C_{D\beta} Re'}{2} = 16\pi(1-\beta)\beta^{0,5}(1+56\beta^{1,5}); \qquad (3.16)$$

уравнение Девиса (3.6)

$$\frac{C_{D\beta} Re'}{2} = 17{,}5\pi(1-\beta)\beta^{0,5}(1+52\beta^{1,5}); \qquad (3.17)$$

уравнение Лэнгмюра

$$\frac{C_{D\beta} Re'}{2} = 4\pi B(1-\beta)\Phi; \qquad (3.18)$$

уравнение Чена

$$\frac{C_{D\beta} Re'}{2} = \frac{k_3}{\ln\left(k_4 \beta^{-0,5}\right)}. \qquad (3.19)$$

Пользуясь преобразованными уравнениями, Чен вычислил значения $C_{D\beta} \frac{Re'}{2}$ (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Значения $\frac{C_{D\beta} Re'}{2}$, вычисленные с помощью различных уравнений; коэффициент Лэнгмюра $B = 1$

β	Уравнение (3.15)	Уравнение (3.16)	Уравнение (3.17)	Уравнение (3.18)	Уравнение (3.19)
0,001	0,057	1,58	1,73	2,32	2,08
0,005	0,282	3,53	3,86	3,30	2,84
0,01	0,575	4,95	5,42	4,00	3,38
0,05	3,14	10,6	12,0	7,46	6,09
0,1	6,95	15,1	18,2	11,4	9,17
0,15	11,8	19,6	26,2	15,6	13,2
0,25	25,2	35,4	54,4	26,6	29,2

Из табл. 3.1 видно, что результаты расчетов по этим уравнениям плохо согласуются между собой. Более близкие цифры дают уравнения Лэнгмюра и Чена. Так как $C_{D\beta}Re'$ пропорционально ΔPr_f^2, то относительные значения r_f^2 для определенного фильтра можно подсчитать по данным табл. 3.1. Следует помнить, что значения Лэнгмюра получены при $B = 1$, хотя B по Лэнгмюру может быть от 0,5 до 1,5.

Как уже ранее указывалось, нельзя гарантировать, что найденный r_f, даже если он верен для частиц одного размера, будет верен для частиц различных размеров. Таким образом, средний радиус волокон можно определить при измерении перепада давлений на фильтре. Далее рассматривается, каким образом средний радиус волокон используется для определения эффективности фильтра.

Эффективность осаждения частиц

На практике качество фильтра оценивается коэффициентом проскока, равным отношению веса частиц, прошедших фильтр, к весу частиц, поступивших в него с воздухом. Однако теоретически удобнее рассчитывать эффективность улавливания, которую в случае отдельного волокна, расположенного перпендикулярно к потоку, можно найти как отношение объема профильтрованного воздуха к объему воздуха, проходящего через сечение, равное площади проекции волокна. Если предположить, что изолированное волокно радиусом r_f улавливает все частицы, находящиеся в слое набегающего потока толщиной $2y$ (см. рис. 3.2), то эффективность осаждения (коэффициент захвата) γ определяется уравнением

$$\gamma = \frac{2y}{2r_f}\,. \tag{3.20}$$

Это отношение используется для расчета эффективности осаждения частиц волокнистым слоем следующим образом. Предположим, что площадь лобовой поверхности волокнистого слоя равна единице, а толщина b. Допустим далее, что радиус волокон r_f, а плотность их упаковки β, при этом β равно отношению объема волокон к общему объему фильтра. Пусть скорость набегающего потока равна v. В этом случае средняя скорость воздуха v_a между волокнами будет

$$v_a = \frac{v}{1-\beta}\,. \tag{3.21}$$

Длина волокон в расчете на единицу объема фильтра равняется

$$L = \frac{\beta}{\pi r_f^2}\,. \tag{3.22}$$

Объем воздуха, фильтруемого в течение 1 *сек* слоем толщиной db, определяется по формуле

$$2yv_a L db = 2yv_a db \frac{\beta}{\pi r_f^2}, \qquad (3.23)$$

а изменение концентрации частиц $-\frac{dn}{n}$ равно

$$-\frac{dn}{n} = \frac{2yv_a db\beta}{v\pi r_f^2}. \qquad (3.24)$$

Это уравнение можно преобразовать:

$$\frac{2y\beta db}{(1-\beta)\pi r_f^2}.$$

Член $\frac{2y}{2r_f}$ представляет собой коэффициент захвата или эффективность осаждения частиц одиночным волокном в слое, которая обозначается γ_e, и вовсе не обязательно, чтобы она равнялась эффективности осаждения частиц на изолированном волокне.

После интегрирования получим

$$\frac{n}{n_0} = e^{-(2\beta\gamma_e b)/[\pi r_f(1-\beta)]}, \qquad (3.25)$$

где n — концентрация частиц за фильтром; n_0 — концентрация частиц, поступающих в фильтр.

Основным уравнением фильтрации монодисперсного аэрозоля через идеальный слой является

$$\frac{n_0 - n}{n_0} = 1 - e^{-\gamma_m}, \qquad (3.26)$$

где $\frac{n_0 - n}{n_0}$ — эффективность осаждения частиц в волокнистом слое; γ_m — показатель фильтрации слоя. Отсюда следует, что

$$\gamma_m = \frac{2\beta b\gamma_e}{\pi r_f(1-\beta)}. \qquad (3.27)$$

После определения γ_m для волокнистого слоя с помощью уравнения (3.27) можно определить эффективность осаждения на одном волокне в слое γ_e, если известен r_f.

Обтекание потоком цилиндра

Распределение линий тока вокруг цилиндра, расположенного перпендикулярно к направлению потока, зависит от числа Рейнольдса, отнесенного к диаметру. При больших и малых значениях этого числа линии тока по своей форме значительно отличаются друг от друга. При больших значениях *Re* (потенциальный или идеальный поток) в набегающем потоке вдали от цилиндра линии тока почти не изгибаются. Значительный изгиб линий тока происходит в непо-

средственной близости от цилиндра. При малых значениях Re(вязкое течение), что характерно для высокоэффективных фильтров, значительное искривление линий тока наблюдается на большом удалении от цилиндра (по Девису [4] это отклонение при $Re = 0,2$ составляет 3% на расстоянии перед цилиндром в 100 диаметров цилиндра), при этом вероятность смещения частиц в стороны от цилиндра больше, чем при более высокой скорости.

Лэмб получил приближенное решение задачи об обтекании цилиндра в непосредственной близости от него при малых значениях Re; позднее другие исследователи опубликовали более точные, но и более сложные решения.

Уравнения Лэмба, полученные для решения задачи об обтекании движущегося в неподвижной жидкости цилиндра, были преобразованы Лэнгмюром в уравнения для неподвижного цилиндра и движущейся жидкости; эти уравнения в полярных координатах имеют следующий вид:

$$v_r = C_L R_r \cos\theta, \tag{3.28}$$

$$v_\theta = C_L R_\theta \sin\theta, \tag{3.29}$$

где

$$R_r = 1 - \frac{r_f^2}{r^2} - 2\ln\left(\frac{r}{r_f}\right) \tag{3.30}$$

и

$$R_\theta = 1 - \frac{r_f^2}{r^2} + 2\ln\left(\frac{r}{r_f}\right). \tag{3.31}$$

В этих уравнениях v_r и v_θ — составляющие скорости частицы, принятой за материальную точку ; r — расстояние от частицы до оси волокна; θ — угол в системе полярных координат; поток течет в направлении $\theta = 0$.

Девис [10] получил более сложное уравнение для распределения линий тока, в то же время выражение для лобового сопротивления совпало с уравнением Лэмба.

Эксперименты Финна [11] подтвердили правильность уравнения Лэмба для лобового сопротивления при малых значениях Re, хотя для очень тонких волокон (с диаметром порядка 1 *мкм*) необходимо вводить некоторые поправки для учета скольжения на поверхности цилиндра.

Осаждение частиц на цилиндре за счет инерционного эффекта

При соблюдении закона сопротивления Стокса (скорость частицы относительно потока незначительна) уравнения движения частицы в прямоугольных координатах имеют следующий вид:

$$m\frac{d^2x}{dt^2} = 6\pi\eta r_p\left[u - \frac{dx}{dt}\right], \tag{3.32}$$

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = 6\pi\eta r_p\left[v - \frac{dy}{dt}\right], \tag{3.33}$$

где m — масса частицы; u и v — составляющие относительные скорости.

Эти уравнения можно представить в безразмерной форме путем подстановок $u_1 = u/v_0$, $v_1 = v/v_0$, $x_1 = x/r_f$, $y_1 = y/r_f$ и $t_1 = tv_0/r_f$ (v_0 — скорость потока на большом расстоянии от цилиндра):

$$K\frac{d^2 x_1}{dt_1^2} + \frac{dx_1}{dt_1} = u_1, \quad (3.34)$$

$$K\frac{d^2 y_1}{dt_1^2} + \frac{dy_1}{dt_1} = v_1, \quad (3.35)$$

где $K = \frac{2r_p^2 \rho v_0}{9\eta r_f}$ — инерционный параметр.

Решение этих уравнений в общем виде можно записать следующим образом:

$$\left(x_1, y_1\right) = f\left(x_0, y_0, t_1, \frac{mv_0}{6\pi\eta r_p r_f}\right), \quad (3.36)$$

где (x_1, y_1) определяют положение частицы во время t_1, а x_0, y_0 — положение частицы во время $t = 0$.

Эти уравнения математическими методами без значительных упрощений не решены. Вообще же для получения приближенного решения следует пользоваться методом численного интегрирования. Инерционный параметр K представляет собой отношение расстояния, которое пройдет частица с начальной скоростью U до остановки, к радиусу цилиндра. Это расстояние в воздухе при 20° С равняется 1230 $r_p^2 \rho U$.

Уравнение для эффективности улавливания цилиндром может быть записано в виде

$$E_a = f\left(K, Re, \frac{r_p}{r_f}\right). \quad (3.37)$$

Из этого уравнения можно видеть, что увеличение скорости и размера частиц способствует осаждению; с увеличением радиуса волокна K и r_p/r_f уменьшаются, хотя значение Re увеличивается. Таким образом, более толстые волокна менее эффективны, чем тонкие. Большое число экспериментальных данных подтверждает расчеты эффективности осаждения при высоких значениях Re, однако таких данных нет для изолированных цилиндров при числах Рейнольдса, представляющих наибольший интерес для высокоэффективной фильтрации.

По-видимому, единственными расчетами для малых чисел Рейнольдса являются расчеты Девиса [4, 12] с использованием гидродинамических формул [10]. Девис рассчитал эффективность захвата частиц, очень малых по сравнению с радиусом волокна, при $Re = 0,2$ и установил, что она равна нулю, когда $K = 0$. Кроме того,

он построил кривые зависимости эффективности E от K для различных значений $R = r_p/r_f$ (рис. 3.4). Эти кривые показывают эф-

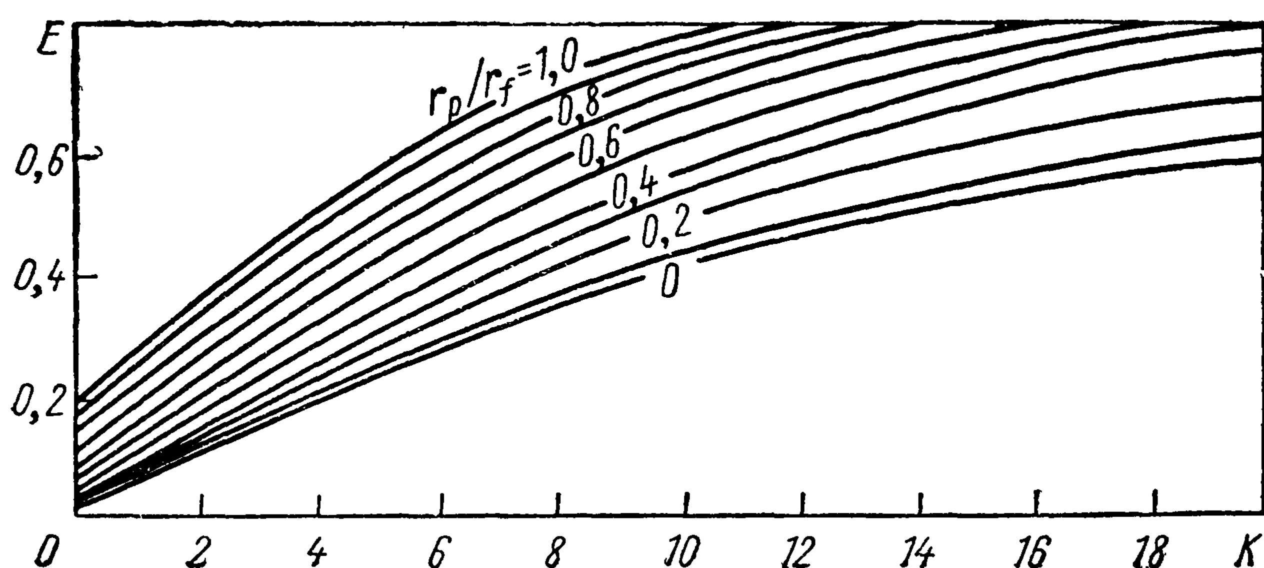


Рис. 3.4. Эффективность инерционного осаждения частиц на цилиндрах при $Re = 0,2$ для различных значений r_p/r_f [4].

фективность осаждения частиц при одновременном действии инерции и зацепления. Девис не учел гидродинамического взаимодействия между частицей и цилиндром, которое, как он считает, должно

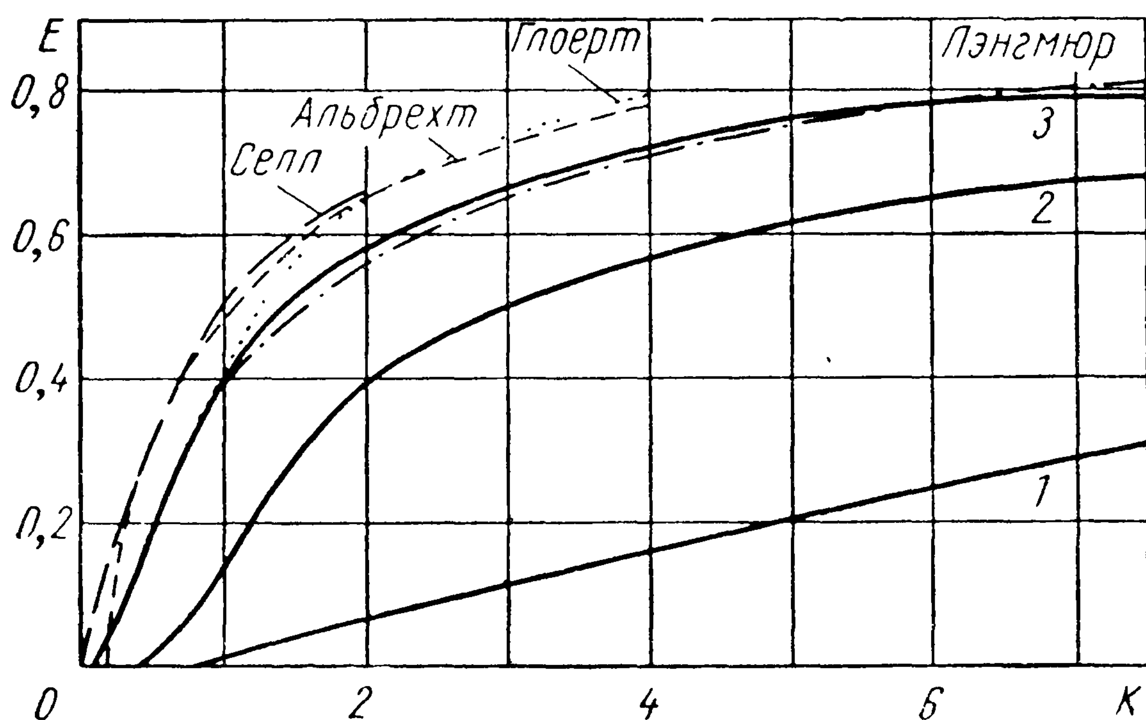


Рис. 3.5. Эффективности инерционного осаждения очень малых частиц на цилиндре по данным разных авторов.

быть заметным при больших значениях r_p, поэтому полученные им эффективности слишком велики.

Девис и Питц подсчитали эффективность осаждения благодаря инерции при $Re = 0,2$ и $r_p/r_f = 0$ и установили, что существует такое критическое значение K (при 0,899), ниже которого столкновения не происходит. Однако, если радиус частицы становится значительным, понятие о критическом значении K теряет свой смысл.

На рис. 3.5 представлены их теоретически вычисленные кривые эффективности улавливания малых частиц при $Re = 0,2$(*1*) и $Re =$

$= 10(2)$, а также кривая для потенциального потока (3) и кривые других исследователей, полученные при больших значениях Re. Следует отметить, что критические значения K при больших Re были вычислены также Альбрехтом [13] ($K = 0{,}18$) и Лэнгмюром и Блоджеттом [14] ($K = 0{,}125$). Исходя из своих расчетов для вязкого обтекания, Лэнгмюр полагал, что критическое значение K должно быть 0,54.

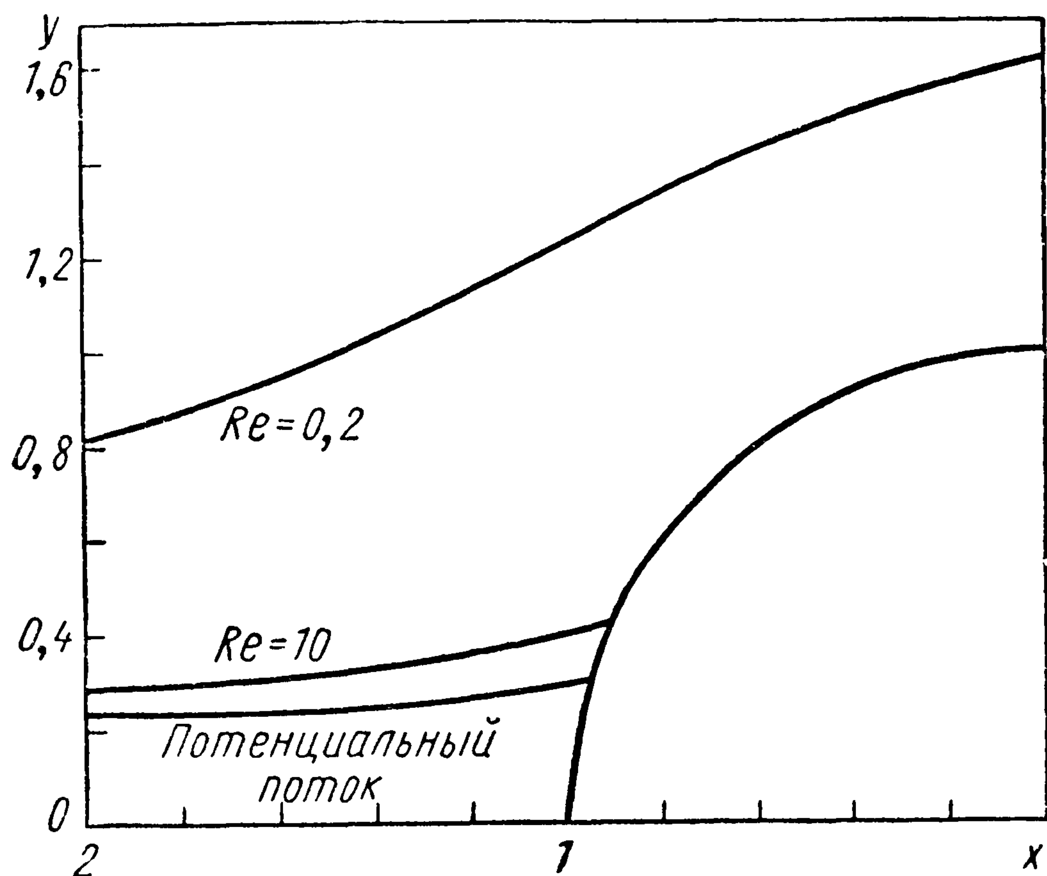


Рис. 3.6. Траектории частицы при разных числах Рейнольдса [12].

Кривые на рис. 3.6, построенные по данным Девиса и Питца, показывают траектории частицы, которая начинает движение при $y = 0{,}2$ и имеет $K = 2$.

Осаждение частиц за счет эффекта зацепления

Лэнгмюр в качестве основы для своей теории принял уравнения потока (3.28) и (3.29) и рассматривал только малые частицы и низкие скорости потока, чтобы пренебречь влиянием инерции. Ниже приведены уравнения Лэнгмюра для определения коэффициента захвата частиц за счет эффекта зацепления.

Из уравнения (3.29) при $\theta = 0°$ объем газа Q, проходящего внутри промежутка, ширина которого определяется расстоянием r_p с обеих сторон от волокна радиусом r_f, равняется

$$Q = 2C_L \int_{r_f}^{r_f+r_p} R_\theta \, dr. \qquad (3.38)$$

После интегрирования получим

$$Q = 2C_L \left\{ -\left[(r_f + r_p)^2 - r_f^2\right](r_f + r_p)^{-1} + 2(r_f + r_p)\ln\frac{r_f + r_p}{r_f} \right\}. \quad (3.39)$$

Это уравнение можно представить и в другом виде:

$$Q = 2C_L r_f \left[2(1 + R)\ln(1 + R) + \frac{1}{1+R} - (1 + R)\right]. \quad (3.40)$$

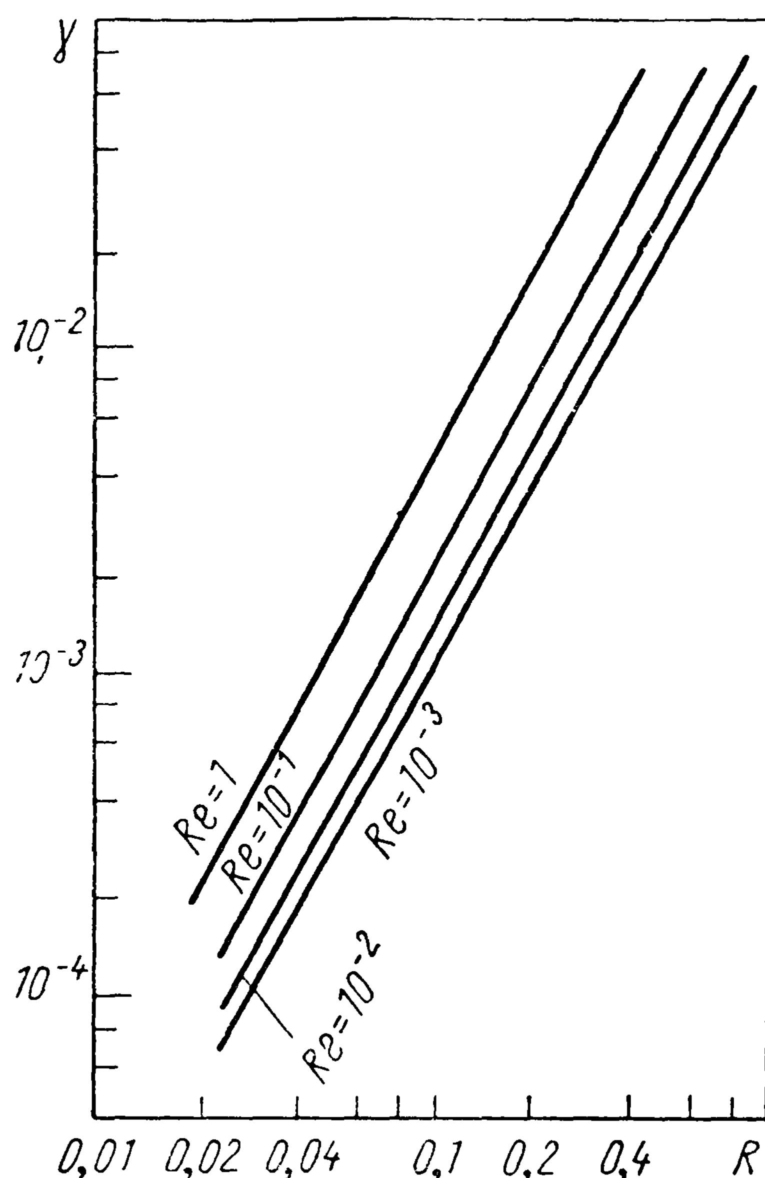


Рис. 3.7. Эффективность осаждения на изолированном цилиндре γ за счет эффекта зацепления R в соответствии с уравнением Лэнгмюра [9].

Расход газа через участок, площадь которого равна площади проекции единицы длины волокна, составляет $2V_0 r_f$, так что эффективность осаждения частиц радиусом r_p за счет зацепления определяется путем деления уравнения (3.40) на $2v_0 r_f$

$$\gamma = \frac{1}{2(2 - \ln Re)}\left[2(1 + R)\ln(1 + R) + \frac{1}{1+R} - (1 + R)\right]. \quad (3.41)$$

Именно такой вид придал Чен уравнению Лэнгмюра для определения эффективности осаждения частиц за счет зацепления. На рис. 3.7 показаны значения γ для различных чисел Re.

Осаждение частиц за счет броуновской диффузии

Расстояние, на которое смещается частица с линии тока вследствие диффузии, было определено Эйнштейном [15]

$$\overline{x^2} = 2\Delta t, \quad (3.42)$$

где $\overline{x^2}$ — средний квадрат смещения частицы за время t; Δ — коэффициент диффузии частицы; t — время.

Однако, как установил Лэнгмюр, частица, которая прошла расстояние $\overline{x}$, могла пройти большее расстояние за меньшее время, поэтому для расчета эффективности осаждения за счет диффузии необходимо допускать, что частица касается волокна только один раз. Затем Лэнгмюр рассмотрел большой объем газа с концентрацией частиц n, расположенный вблизи плоской поверхности; число

частиц, осадившихся на единице площади поверхности за время t, равно

$$\sigma = 2n\left(\frac{\Delta t}{\pi}\right)^{1/2}. \qquad (3.43)$$

Из этого уравнения следует

$$x = \left(\frac{4\Delta t}{\pi}\right)^{1/2}, \qquad (3.44)$$

где x — толщина слоя, из которого удаляются частицы, составляющая около 80% величины, определяемой уравнением (3.42). После этого Лэнгмюр рассчитал время, необходимое для перемещения частицы между точками с $\theta = +60°$ и $\theta = -60°$:

$$t = \frac{0{,}556\, r_f^2}{C_L\, x_0}, \qquad (3.45)$$

где x_0 — толщина слоя при $\theta = \frac{\pi}{2}$, из которого частицы удаляются вследствие диффузии.

Среднеквадратичное расстояние от волокна, с которого улавливаются частицы за это время, будет

$$x_e = 1{,}12\, x_0. \qquad (3.46)$$

Подставив это значение в уравнение (3.44), получим

$$\left(\frac{x_0}{r_f}\right)^3 = \frac{0{,}56\,\Delta}{C_L\, r_f}, \qquad (3.47)$$

что по аналогии с уравнением (3.41) дает

$$\gamma_{\text{дифф}} = \frac{C_L}{v_0}\left[2\left(1+\frac{x_0}{r_f}\right)\ln\left(1+\frac{x_0}{r_f}\right) - \left(1+\frac{x_0}{r_f}\right) + \frac{1}{1+\frac{x_0}{r_f}}\right]. \qquad (3.48)$$

Натансон [16] получил это уравнение в следующей форме:

$$\gamma = 1{,}36\left(\frac{C_L}{v_0}\right)^{1/3}\left(\frac{\Delta}{v_0\, r_f}\right)^{2/3}. \qquad (3.49)$$

Оно показывает, что γ зависит от $v^{-2/3}$, так как C_L почти пропорционально v_0. Исходя из дифференциального уравнения диффузии для круглого цилиндра, расположенного перпендикулярно к потоку, Натансон получил аналогичное выражение, но с численным коэффициентом 2,32 вместо 1,36. Он также определил γ для случая потенциального обтекания

$$\gamma = \frac{4}{\sqrt{\pi}}\left(\frac{\Delta}{v_0\, r_f}\right)^{1/2}. \qquad (3.50)$$

Это уравнение очень похоже на уравнение Стейерменда [17]. По иному к решению этой задачи подошел Ранц [18], который провел аналогию с теплопередачей и дал полутеоретическое уравнение

$$\gamma = \left(\frac{\pi\Delta}{2v_0 r_f}\right)\left[\frac{1}{\pi} + 0{,}55\left(\frac{2r_f v_0}{\Delta}\right)^{1/3}\left(\frac{2r_f v_0 \rho}{\eta}\right)^{1/6}\right]. \qquad (3.51)$$

Результаты вычислений довольно хорошо согласуются с результатами вычислений по Лэнгмюру.

Уравнения Лэнгмюра для расчета эффективности при одновременном действии эффектов диффузии и зацепления

Уравнение Лэнгмюра (3.48) позволяет определить эффективность осаждения в том случае, когда эффекты диффузии преобладают над эффектом зацепления. Для расчета одновременного действия обоих факторов следует учесть, что частица осаждается тогда, когда ее центр приближается к поверхности волокна на расстояние r_p. В этом случае эффективный путь диффузии равен $(x_0 - r_p)$ вместо x_0, так что уравнение (3.47) можно записать в виде

$$\left(\frac{x' - r_p}{r_f}\right)^2 \frac{x'}{r_f} = \frac{0{,}56\Delta}{C_L r_f} = \left(\frac{x_0}{r_f}\right)^3; \qquad (3.52)$$

где x' — толщина слоя при $\theta = \frac{\pi}{2}$, из которого частицы осаждаются за счет диффузии и зацепления.

После решения уравнения третьего порядка относительно x' полученное значение следует подставить в уравнение (3.48) вместо x_0. Полученная таким образом эффективность осаждения частиц значительно выше простой суммы эффективности за счет диффузии и зацепления.

Теория Девиса об осаждении частиц одиночными волокнами

Девис [4] принял главный параметр частицы P_F в качестве критерия подобия фильтрации, причем

$$P_F = P_i + P_d, \qquad (3.53)$$

в котором $P_i = \frac{2v_0 r_p^2 \rho}{9\eta r_f}$ — инерционный параметр; $P_d = \frac{\Delta}{v_0 r_f}$ — диффузионный параметр.

Используя свою собственную гидродинамическую формулу обтекания изолированного цилиндра, он построил график зависимости y/r_f от $\frac{r_p}{r_f}$ для различных значений P_F, причем величины P_F определя-

лись по уравнению (3.53), а y — по уравнению (3.20). Фактически это те же кривые, что представлены на рис. 3.4, только вместо K подставлен P_f. Когда $P_f = 0$, частицы движутся по линиям тока и осаждаются только вследствие зацепления. Значения коэффициентов осаждения для $\frac{r_p}{r_f} \approx 1$ хорошо согласуются с результатами вычислений по уравнению (3.41), однако при $r_p/r_f < 0{,}75$ теория Девиса дает более высокие значения коэффициентов осаждения частиц. Для своих кривых Девис вывел следующее уравнение:

$$\frac{y}{r_f} = 0{,}16\left[R + (0{,}25 + 0{,}4\,R)\,P_F - 0{,}0263\,RP_F^2\right]. \qquad (3.54)$$

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ К ФИЛЬТРАМ

Уравнения для осаждения частиц на изолированном волокне Лэнгмюр преобразовал с целью определения эффективности улавливания реальных фильтров. Скорость течения вблизи волокон определяется уравнениями (3.28) и (3.29). Хотя в фильтре соседние волокна влияют на величину C_L, поле течения вблизи всех волокон в слое будет одинаковым. Лэнгмюр считал, что в результате измерений перепадов давления он сможет найти величину C вместо C_L.

Для идеального фильтра с волокнами радиусом r_f и плотностью упаковки β общая длина волокон в единице объема фильтра L будет равна $\beta/\pi r_f^2$. Таким образом, перепад давления

$$\Delta P = Lbf_D, \qquad (3.55)$$

где f_D — сила сопротивления на единицу длины волокна в фильтре. Сила лобового сопротивления для изолированного волокна, как известно, равна $8\pi\eta C_L$. Если в этом выражении заменить C_L на искомую величину C и записать его в виде $8\pi\eta C$, то $\Delta P = Lbf_D = 8\beta bC\eta/r_f^2$, так что

$$C = \frac{\Delta P r_f^2}{8\eta\beta b}. \qquad (3.56)$$

[В оригинале работы Лэнгмюр приравнивал перепад давления к силе трения $4\pi\eta C$, а не к силе лобового сопротивления. В результате этого его величина C в два раза меньше той величины, которая определяется уравнением (3.56). Все последующие уравнения теории Лэнгмюра представлены в таком виде, что допускалась правильность уравнения (3.56)].

Показатель фильтрации фильтра, улавливающего частицы за счет эффекта зацепления γ_m, становится равным QLb/v_a; разлагая уравнение (3.40) в ряд и подставляя приведенное значение γ_m, получим

$$\gamma_m = \frac{\Delta P r_p^2}{2\pi v_a \eta r_f}\left[1 - \frac{2}{3}R + \frac{7R^2}{12}\ldots\right]. \qquad (3.57)$$

В случае диффузионного осаждения подстановка величины C, вычисленной Лэнгмюром, дает следующее выражение:

$$x_0^3 = \frac{4{,}48\,\eta\Delta\beta b}{\Delta P}. \qquad (3.58)$$

Учитывая, что x_0 аналогично r_p при расчете эффекта зацепления и пренебрегая членами с R, будем иметь

$$\gamma_{m\,(\text{дифф})} = \frac{\Delta P x_0^2}{2\pi\eta v_a r_f}. \qquad (3.59)$$

Для учета совместного действия эффектов диффузии и зацепления значение C_L подставляют в уравнение (3.52)

$$(x' - r_p)^2 x' = \frac{4{,}48\Delta\beta b\eta\alpha}{\Delta P}, \qquad (3.60)$$

где α — коэффициент, значение которого близко к единице и который вводится для учета неточностей теории, неравномерности распределения волокон и их неодинаковой формы. Для получения γ_m при совместном действии эффектов диффузии и зацепления уравнение (3.60) решается относительно x', а полученное значение подставляют в уравнение (3.59) вместо x_0.

На поверхности волокон происходит скольжение газа, что приводит к увеличению скорости течения вблизи волокон. Обычно это не имеет большого значения для фильтрации, за исключением случаев использования очень тонких волокон. Если учесть это скольжение, происходящее в слое, толщина которого приблизительно равна λ (средняя длина пути свободного пробега молекул газа), то уравнения Лэнгмюра примут следующий вид:

$$(x' - r_p)^2 (x' + 0{,}68\,\lambda) = \frac{4{,}48\Delta\eta\beta b\alpha}{\Delta P} \qquad (3.61)$$

и

$$\gamma_m = \frac{\Delta P x'}{2\eta v_a r_f}(x' + 1{,}36\,\lambda). \qquad (3.62)$$

Для учета влияния соседних волокон на эффективность Девис [4] использовал рассчитанное Кавасным поле течения жидкости через двухмерную решетку и определил y/r_f для различных значений R при $\beta = 0{,}08$ и $\beta = 0{,}213$ (рис. 3.8).

Представленные кривые приблизительно соответствуют следующему уравнению:

$$\frac{y}{r_f} = R\,(0{,}16 + 10{,}9\,\beta - 17\,\beta^2). \qquad (3.63)$$

Комбинируя это выражение с уравнением (3.54) для одиночного волокна, Девис вывел для суммарного коэффициента осаждения следующее выражение:

$$\frac{y}{r_f} = \left[R + (0,25 + 0,4\,R)\,P_F - 0,0263\,RP_F^2\right](0,16 + 10,9\beta - 17\beta^2). \tag{3.64}$$

Это уравнение вместе с уравнением (3.25) составляют основу в решении проблемы фильтрации по Девису.

Грин и Томас [19] в рецензии на статью Девиса, основываясь на результатах экспериментов, показали, что он занизил эффективность фильтров, тогда как по теории Лэнгмюра, несмотря на отсутствие инерционного параметра, абсолютная эффективность фильтров завышена. Несомненно, Лэнгмюр был прав, считая, что инерция является второстепенным фактором при низких скоростях фильтрации субмикронных частиц. Однако следует поощрять попытки создания теории фильтрации, учитывающей все факторы. Кроме того, Лэнгмюр, по-видимому, переоценил эффект диффузии.

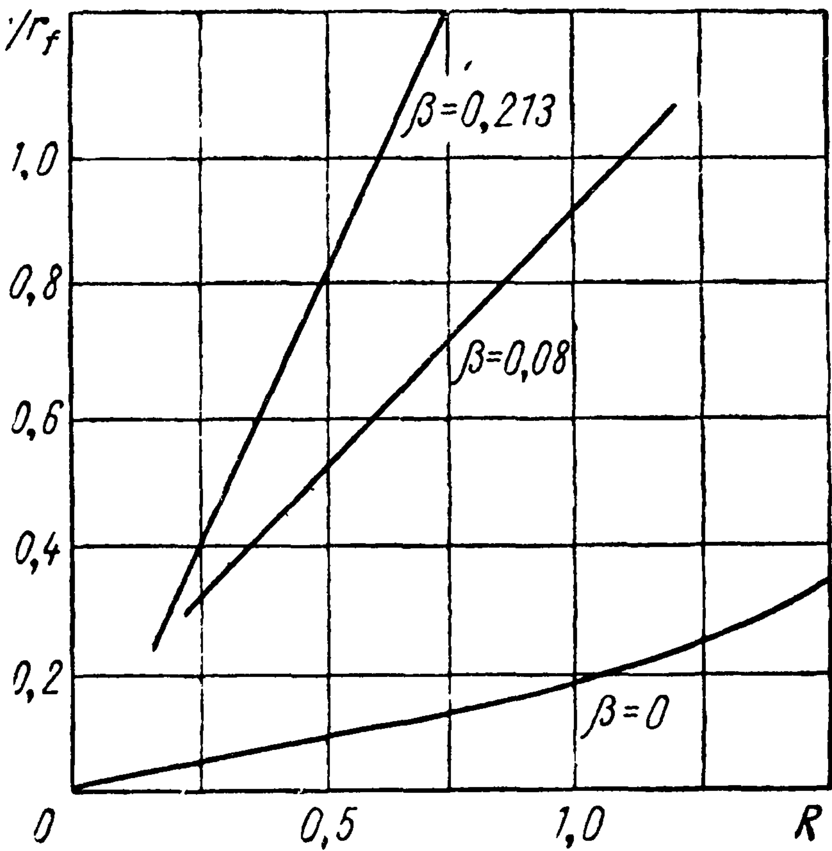


Рис. 3.8. Осаждение частиц на цилиндре за счет эффекта зацепления при $K = 0$ [4].

Таблица 3.2

Коэффициенты проскока частиц через идеальный фильтр по разным теориям

Радиус частиц, *мкм*	Коэффициент проскока, %	
	По Лэнгмюру	По Девису
0,05	8,5	63
0,07	15,5	53
0,1	16	41
0,2	14	17
0,3	6,5	6

В табл. 3.2 сравниваются данные теории Лэнгмюра и Девиса применительно к идеальному фильтру с волокнами радиусом 1 *мкм*, толщиной 1,0 *см* и плотностью упаковки 0,006 при скорости потока 6,7 *см/сек* [20].

По теории Девиса через идеальный фильтр максимальный проскок (70%) имеют частицы радиусом 0,025 *мкм*, тогда как по теории Лэнгмюра — частицы радиусом 0,12 *мкм* (16%).

Ни Лэнгмюр, ни Девис не утверждали, что их теории являются точными; ими можно пользоваться только в качестве общего руководства при решении проблем фильтрации. Подкрепленные экспериментальными данными, эти теории дают возможность предсказывать коэффициент проскока в ограниченном диапазоне плотностей упаковки и размеров частиц. С помощью этих теорий получено более

ясное представление о различных факторах, влияющих на фильтрацию. Практически эти теории не используются производственниками при создании фильтров с определенным коэффициентом проскока по стандартному аэрозолю и с определенными скоростями потока и перепадами давлений. Дело в том, что фильтры состоят из неоднородных скоплений волокон с различной ориентацией и различной степенью агрегации, которые не поддаются математическому анализу.

Сравнительно недавно была опубликована теория Фридлендера и Пасцери [21], развитая на основе метода анализа размерностей (и в этом отношении она совершенно отличается от теорий Лэнгмюра и Девиса). Данные, полученные с помощью этой теории, хорошо согласуются с данными Чена [22], а также Уонга и Джонстона [23] для осаждения частиц за счет диффузии и зацепления. Эта теория, как и теории Лэнгмюра и Девиса, требует точного знания радиуса волокон (в этом случае необходимо использовать среднеарифметическое значение).

Фильтры электрического типа

Изложенные выше теории относятся к фильтрам механического типа. Однако имеются фильтры, действие которых основано на электрическом притяжении частиц к волокнам. Эти волокна (обычно шерстяные диаметром 20 *мкм*) соприкасаются с твердыми частицами смол размером около 1 *мкм*. Смола и шерсть сцепляются друг с другом под действием сил электрического притяжения, так как частицы смолы заряжаются отрицательно, а волокна шерсти — положительно, в целом этот фильтр нейтрален. Заряды возникают также в результате трения при изготовлении, и их эффективный радиус действия по расчетам Уолтона равен 3 *мкм* [24].

Эффективность фильтров электрического типа зависит не только от заряда волокон, но и от заряда частиц. При пропускании через фильтр аэрозолей с субмикронными частицами, полученных распылением водного раствора с последующим испарением воды (около 40% всех частиц было заряжено положительно и 40% — отрицательно), проскочило 0,5% частиц. При обработке аэрозолей отрицательными ионами частицы получали больший заряд и коэффициент проскока снижался приблизительно до 0,05%. Коэффициент проскока нейтральных частиц того же размера составил 1,0%. Эффективность механических фильтров также зависит от величины заряда частиц, но в значительно меньшей степени.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРИИ

Исследовательские работы по проверке теории обычно проводят с таким расчетом, чтобы выделить один из основных механизмов улавливания, хотя добиться этого довольно трудно. Только в последние годы в области экспериментирования были достигнуты большие успехи, так как появилась возможность создавать монодисперс-

ные аэрозоли и применять электронную микроскопию для измерения субмикронных частиц. Поэтому при рассмотрении экспериментов можно отбросить все данные двадцатилетней давности, а новейшие эксперименты желательно сгруппировать по их характеру, а не в хронологическом порядке. Мы руководствовались в основном именно этим принципом.

Коэффициент проскока и размер частиц

На форму кривых зависимости коэффициента проскока от размера частиц влияют диаметр волокон, плотность упаковки, скорость потока, удельный вес частиц и другие параметры. Поэтому каждая кривая имеет свои особенности, определяемые характеристиками фильтра и условиями его эксплуатации.

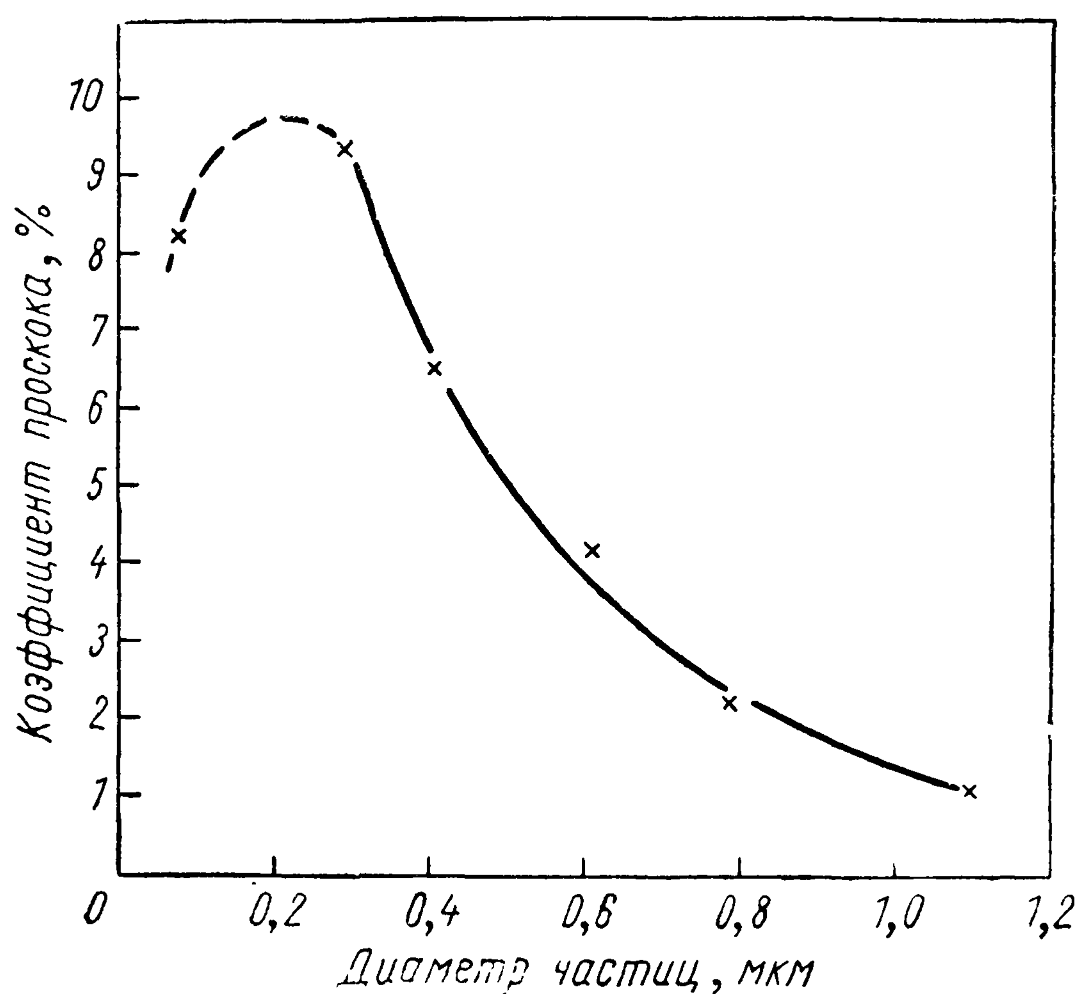


Рис. 3.9. Зависимость коэффициента проскока через асбесто-шерстяной фильтр от размера частиц.

На рис. 3.9 изображена кривая, полученная при исследовании фильтрации частиц хлористого натрия через фильтр с асбесто-шерстяными волокнами при скорости потока 4 *см/сек*. Коэффициент проскока метиленовой голубой через этот фильтр составляет около 5% (аэрозоли метиленовой голубой и хлористого натрия, которые обычно используются при стандартных испытаниях, являются полидисперсными; максимальный эквивалентный диаметр их около 1,5 *мкм*, медианный весовой диаметр 0,5—0,6 *мкм*). Эта кривая показывает характер изменения коэффициента проскока частиц различного размера. Экспериментальные и теоретические данные о размере частиц с максимальным проскоком совпадают.

Вероятно, наиболее интересными являются эксперименты по оценке изменения коэффициента проскока в зависимости от размера частиц при определенной скорости потока, особенно в тех случаях, когда диаметр частиц меньше 0,3 *мкм*. Хотя экспериментально и теоретически было установлено, что частицы большего размера хуже проникают через фильтр, чем частицы меньшего размера диаметром вплоть до 0,3 *мкм*, было очень много дискуссий о том, увеличивается ли коэффициент проскока частиц значительно меньшего размера вследствие возрастания интенсивности броуновского движения. Этот вопрос имеет большое значение в тех случаях, когда требуется обеспечить защиту от очень токсичных высокодисперсных частиц и мельчайших болезнетворных организмов. Например, размеры вирусов обычно лежат в пределах 0,01—0,2 *мкм*, и, если они остаются вирулентными в дисперсном состоянии, они могут представлять серьезную опасность. Фрейндлих привел данные о проникании высокодисперсных частиц хлористого дифениларсина через немецкий военный фильтр из тонкой бумаги при объемной скорости 30 *л/мин* (табл. 3.3).

Результаты Фрейндлиха подтвердил Грин [25] в опытах с фильтрами, состоящими из волокон размером 6 *мкм*, с использованием высокодисперсных аэрозолей мышьяка при скорости потока 6 *см/сек*. Для укрупнения частиц, чтобы их лучше было видно, он применял конденсационный метод Вильсона.

Таблица 3.3

Изменение коэффициента проскока в зависимости от диаметра частиц

Диаметр частиц, *мкм*	Коэффициент проскока, %
<0,1	52,4
0,1—0,2	87,6
0,2—0,4	93,9
0,4—0,8	30,4
0,8—1,6	4,2
>1,6	0

Экспериментируя с жидкими и полужидкими аэродисперсными системами на бумажных фильтрах, Ламер [26] не обнаружил частиц с максимальным коэффициентом проскока (минимальная скорость потока составляла 4 *см/сек*). Аналогичные результаты получили Лейн и др. [27], которые использовали монодисперсные жидкие аэрозоли, полученные в генераторе Синклера — Ламера [28]. Наименьший размер частиц в использованных аэрозолях составлял 0,3 *мкм*.

Чен [9] проводил свои эксперименты с монодисперсными аэрозолями, минимальный диаметр частиц которых составлял 0,15 *мкм*, используя стекловолокнистые слои со средним диаметром волокон 2,5 *мкм*. При скоростях выше 4 *см/сек* он не установил размера частиц с максимальным коэффициентом проскока, однако при меньших скоростях такие частицы наблюдались. Чен полагал, что для бумажных фильтров критическая скорость должна быть менее 4 *см/сек*, тогда как для очень крупных волокон она будет выше.

Разрабатывая теорию диффузии, основанную на концепциях Фридлендера [30] о диффузионном пограничном слое, Торжесон [29] пришел к выводу, что его расчеты хорошо согласуются с ре-

зультатами экспериментов Чена. Джиллеспи [31] в своей теоретической работе также предсказал существование размера частиц с максимальным коэффициентом проскока при потенциальном течении, причем максимум проскока под влиянием заряда на волокнах смещается в область более крупных частиц. Кроме того, он экспериментально установил, что небольшие заряды, имеющиеся в обычных условиях на волокнах, имеют чисто механическое происхождение.

Весьма тщательное экспериментальное исследование было проведено Томасом и Гаррисом [32], которые для определения коэффициента проскока полидисперсного полистиролового аэрозоля использовали электронную микроскопию проб до фильтра и после него. Исходный аэрозоль содержал частицы размером от 0,01 до 1 *мкм*, причем некоторая доля частиц была электрически заряженной. После пропускания исходного аэрозоля число нейтральных частиц на выходе из предфильтра значительно возросло. Результаты, полученные при скорости потока 11,6 *см/сек*, показали, что слоевые фильтры, улавливающая способность которых обусловливалась главным образом наличием в слое тонкодисперсных асбестовых волокон, имеют максимальный коэффициент проскока частиц диаметром 0,15 *мкм* независимо от того, проводилась или нет предварительная фильтрация исходного аэрозоля; причем коэффициент проскока был больше для аэрозоля, предварительно пропущенного через предфильтр. Когда же в качестве фильтрующей среды использовалась бумага из альфа-целлюлозы, то частиц с максимальным коэффициентом проскока при скоростях выше 13 *см/сек* обнаружить не удалось; однако при скорости 5 *см/сек* оба вида аэрозолей имели такие частицы. В предварительно отфильтрованном аэрозоле такими оказались частицы диаметром 0,2 *мкм*, а при пропускании исходного аэрозоля — частицы диаметром 0,1 *мкм*. Кроме того, было обнаружено, что на шерстяно-смоляных материалах максимально проникающими являются частицы диаметром 0,25 *мкм*. Дарлоу [33] показал, что при скорости 12 *см/сек* частицы диаметром 0,3 *мкм* легче проникают через бумажные фильтры, чем вирусы диаметром 0,03 *мкм*.

Дорман [34], используя полученные термическим путем аэрозоли, состоящие из частиц хлористого натрия диаметром менее 0,1 *мкм*, определил коэффициенты проскока различных материалов с помощью пламенного фотометра. Высокая точность этого метода позволила исследовать высокоэффективные фильтры. Измерения показали, что около 30% частиц в этих аэрозолях несут электрические заряды. Результаты опытов (табл. 3.4—3.6) свидетельствуют об уменьшении коэффициентов проскока частиц хлористого натрия по сравнению с коэффициентом проскока полидисперсного аэрозоля метиленовой голубой с медианным весовым диаметром частиц 0,5 *мкм*. Коэффициенты проскока аэрозолей метиленовой голубой и хлористого натрия при стандартных испытаниях можно ориентировочно сравнивать с коэффициентами проскока по монодисперсному аэрозолю с частицами диаметром 0,3 *мкм*. Коэффициент проскока

Таблица 3.4

Коэффициенты проскока стекловолокнистого бумажного фильтра; коэффициент проскока метиленовой голубой 5—8% при скорости 4,5 *см/сек*; максимальный эквивалентный диаметр частиц хлористого натрия 0,02 *мкм*

Скорость потока, *см/сек*	Коэффициент проскока, %
2,25	0,06
4,5	0,13
9,0	0,6
13,5	1,1

Таблица 3.5

Коэффициенты проскока стекловолокнистого бумажного фильтра; коэффициент проскока метиленовой голубой 0,05% при скорости 10 *см/сек*; максимальный эквивалентный диаметр частиц хлористого натрия 0,1 *мкм*

Скорость потока, *см/сек*	Коэффициент потока, %
6,7	0,006
11,5	0,01

Таблица 3.6

Коэффициент проскока бумажного фильтра из эспарто; коэффициент проскока метиленовой голубой 80% при скорости 4,5 *см/сек*; максимальный эквивалентный диаметр частиц хлористого натрия: *А*—0,02 *мкм*; *Б* (после выдержки аэрозоля)—0,05 *мкм*; *В* (после выдержки аэрозоля и удаления наиболее мелких частиц в предфильтре)—0,1 *мкм*

Скорость потока, *см/сек*	Коэффициент проскока, %		
	А	*Б*	*В*
1,5	0,18	0,6	20
3,0	0,5	1,0	27
4,5	0,8	2,3	34
7,5	2,0	4,9	—

аэрозолей хлористого натрия бумажных фильтров при стандартных испытаниях примерно в два раза больше коэффициента проскока монодисперсного тумана диоктилфталата с частицами диаметром 0,3 *мкм*, который равен 0,01% при скорости воздушного потока 10 *см/сек*. Особенно показательны данные для бумажного фильтра из эспарто, свидетельствующие о быстром повышении коэффициента проскока при увеличении среднего размера частиц.

Даймент и др. [35] измерили коэффициенты проскока частиц хлористого натрия стекловолокнистых матов. Пробоотбор проводили электропреципитатором, подсчет частиц и определение их размеров вели с помощью электронномикроскопических снимков. Они установили, что при скорости 2,5 *см/сек* максимальным коэффициентом проскока обладают частицы диаметром 0,15 *мкм*. При скорости 20 *см/сек* максимальный коэффициент проскока наблюдается для частиц диаметром около 0,13 *мкм*. Такое уменьшение размера час-

тиц при увеличении скорости значительно меньше теоретически ожидаемого.

Фицжеральд и Детвейлер [36] сообщили об экспериментах по изучению проскока полидисперсных аэрозолей перманганата калия через фильтровальные бумаги. Пробы, взятые на мембранные фильтры, изучались под электронным микроскопом. Было обнаружено, что при скорости 150 *см/сек* наибольшим коэффициентом проскока через ватман № 40 и № 41 характеризуются частицы диаметром 0,01—0,04 *мкм*; при скорости 2—10 *см/сек* максимальный коэффициент проскока трех других бумаг принадлежал частицам диаметром 0,01—0,02 *мкм*. Этот размер частиц намного меньше тех размеров, о которых сообщали другие исследователи. Опубликованные фотоснимки мембранных фильтров показывают, что анализ, вероятно, был весьма трудным. Фицжеральд и Детвейлер [37] определяли также эффективность мембранных фильтров по аэрозолям перманганата калия, пробы в отфильтрованном воздухе отбирались мембранными фильтрами. Они обнаружили, что максимальный коэффициент проскока (не менее 76%) принадлежит частицам диаметром 0,02 *мкм*.

Мегоу и Уиффен [38] подвергали аналогичным испытаниям такие же мембранные фильтры, но максимума проникания не обнаружили, хотя, по утверждению авторов, можно было легко определить коэффициент проскока до 0,1%. Линдекин и др. [39] также определяли проникание частиц через ватман № 41, используя монодисперсные аэрозоли из частиц полистиролового латекса размером 0,088, 0,188, 0,264, 0,365 и 0,557 *мкм* и измеряя коэффициенты проскока методом светорассеяния. При скорости потока 10 *см/сек* максимальный коэффициент проскока принадлежит частицам диаметром 0,35 *мкм*, а при скорости 3,2 *см/сек* — частицам диаметром 0,19 *мкм*.

Весь этот экспериментальный материал показывает, что существует оптимальный для максимального коэффициента проскока размер частиц, который зависит от типа фильтра, плотности упаковки, диаметра волокон и скорости воздушного потока и, вероятно, в подавляющем большинстве случаев лежит в пределах от 0,1 до 0,3 *м м*. Обычно при увеличении скорости воздушного потока и, следовательно, при уменьшении осаждения за счет диффузии максимальный коэффициент проскока смещается по направлению к частицам меньшего размера, а для фильтров с более крупными волокнами он наблюдается при более высоких скоростях.

Фильтрация через волокнистые материалы частиц диаметром 1 мкм. Очень мало работ посвящено изучению фильтрации частиц диаметром 1 *мкм* через обычные волокнистые фильтры, хотя такие размеры типичны для бактерий.

Терьесен и Черри [40] проводили эксперименты, используя в качестве фильтрующего материала слой минеральной ваты (стиллита), а в качестве взвешенных частиц *Bacillus subtilis*. Минимальный коэффициент проскока, определенный их методом (по росту колоний спор диаметром 1 *мкм*), составил 0,0004% (табл. 3.7).

Таблица 3.7

Данные по фильтрации через слой стиллита

Толщина слоя	7,62 *см*
Скорость потока	30 *см/сек*
Плотность упаковки слоя	0,1
Перепад давления	330 *мм вод. ст.*
Волокна диаметром <6 *мкм*	82%
<18 *мкм*	99%
Коэффициент проскока	Проскок не обнаружен

Эти данные можно сравнить с результатами Сергисона [41], полученными на аэрозолях с частицами диоктилфталата диаметром 1 *мкм* на стекловолокнистых фильтрах (табл. 3.8, 3.9).

Таблица 3.8

Данные по фильтрации через стекловолокно второго типа (см. гл. IV)

Толщина слоя	4 *см*
Скорость потока	11,2 *см/сек*
Плотность упаковки слоя	0,07
Волокна диаметром:	
<3 *мкм*	50%
<7 *мкм*	95%
<9 *мкм*	99%
Коэффициент проскока (экстраполяция)	0,01%
Коэффициент проскока по метиленовой голубой	0,9%

Таблица 3.9

Данные по фильтрации через слой стеклянных волокон третьего типа (см. гл. IV)

Толщина слоя	8 *см*
Скорость потока	11,2 *см/сек*
Плотность упаковки слоя	0,07
Перепад давления	60 *мм вод. ст.*
Волокна диаметром:	
< 6 *мкм*	50%
< 9 *мкм*	90%
<11 *мкм*	99%
Коэффициент проскока	0,1%
Коэффициент проскока по метиленовой голубой	3%

Экстраполяцией было определено, что коэффициент проскока слоя толщиной 8 *см* будет составлять 10^{-6}% при $\Delta P = 5$ *мм вод. ст.*, а коэффициент проскока слоя толщиной 16 *см* будет 0,0001% при $\Delta P = 120$ *мм вод. ст.*

На рис. 3.10 приведены результаты стандартных испытаний фильтров, снаряженных асбесто-целлюлозной и стекловолокнистой бумагой по аэрозолям хлористого натрия и спор (см. табл. 3.8 и 3.9).

Наиболее низкие значения коэффициентов проскока для аэрозоля хлористого натрия (10^{-3}%) и для спор (10^{-5}%) являются сред-

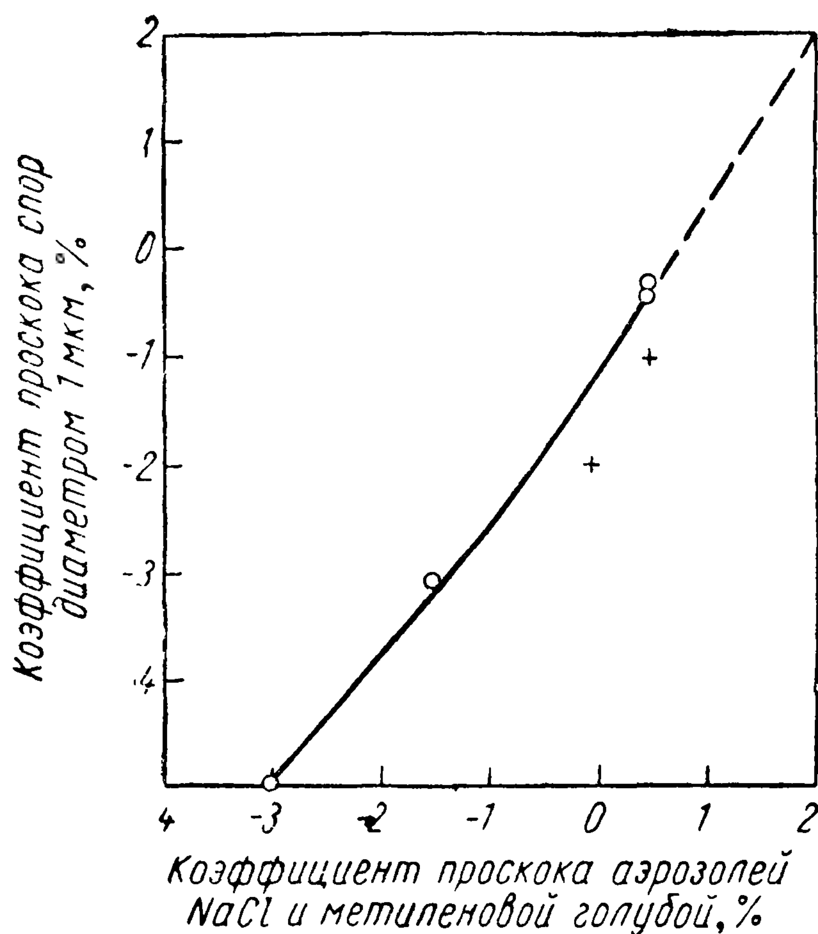


Рис 3 10 Сравнение коэффициентов проскока аэрозолей хлористого натрия или метиленовой голубой и спор диаметром 1 *мкм* по данным Дарлоу (o) при $v = 1{,}5$ *см/сек* и Сергисона (+) при $v = 11{,}2$ *см/сек*.

ними величинами по результатам 30 опытов в каждом случае. Пето также проводил сравнение коэффициентов проскока для аэрозолей хлористого натрия и спор и установил определенную связь между ними. Эта взаимосвязь четко проявляется только при скоростях порядка 1,5 *см/сек*.

Коэффициент проскока и скорость

Из теории фильтрации следует, что коэффициент проскока монодисперсных аэрозолей с увеличением скорости вначале должен увеличиваться, достигая максимума, а затем при дальнейшем росте скорости уменьшаться, так как возрастает влияние инерции. Чем меньше размер частиц, тем больше скорость, при которой коэффициент проскока достигает своего максимального значения.

Рамскилл и Андерсон [2] провели такие эксперименты на монодисперсных аэрозолях серной кислоты и диоктилфталата с частицами размером от 0,2 до 0,8 *мкм*, определяя коэффициенты проскока методом светорассеяния. Они отмечали сопротивление фильтра, средний диаметр волокон и изменение коэффициентов проскока при скоростях вплоть до 285 *см/сек*. Некоторые из полученных зависимостей коэффициентов проскока от скорости потока свидетельствуют о росте проникания и последующем неуклонном снижении, хотя другие кривые показывают только снижение коэффициента проскока.

При анализе полученных результатов авторы исходили из наблюдений Альбрехта [13] по образованию инея на проводах, в которых он установил, что величина смещения частицы в сторону от линии тока определяется выражением

$$X = 1\,230\, r_p^2 \rho_p v. \qquad (3.65)$$

Рамскилл и Андерсон показали, что X можно заменить расстоянием Kr_e, где r_e — эффективный радиус волокна, а K определяется экспериментальным путем. По результатам анализа максимальное значение K составляет 0,56, в то время как Лэнгмюр установил, что инерционное осаждение частиц не происходит, когда $K < 0{,}54$ при вязком течении. Вероятно, доводы Рамскилла и Андерсона чрезвычайно упрощены.

Джиллеспи [31] в своей рецензии на их работу высказал мнение, что в их уравнения необходимо ввести коэффициент срыва частиц. Он полагал, что при столкновении с волокном частицы не всегда остаются на нем. Это зависит от размера и скорости частиц, а также от их природы.

Дорман [42] попытался оценить относительное значение инерции, диффузии и зацепления в тех экспериментах Рамскилла и Андерсона, в которых в качестве аэрозоля использовались частицы диоктилфталата диаметром 0,3 *мкм*. Исходя из основного уравнения фильтрации [уравнение (3.26)], он предположил, что γ_m можно считать суммой трех компонентов, в которой эффект зацепления не зависит от скорости, диффузия зависит от $v^{-1/2}$, а инерция — от v^z. Хотя изменение скорости должно влиять на характер обтекания волокон, предположение о том, что зацепление не зависит от скорости, приемлемо, по-видимому, для весьма широкого диапазона скоростей. Дорман считал, что

$$n = n_0 \, e^{-(G' v^z + D' v^{-1/2} + I')}, \qquad (3.66)$$

где G', D' и I' — члены, учитывающие эффекты инерции, диффузии и зацепления. Введя в это уравнение коэффициент проскока K в процентах и убрав штрихи, получим

$$\lg K = 2 - Gv^z - Dv^{-1/2} - I. \qquad (3.67)$$

Было установлено, что это уравнение соответствует результатам Рамскилла и Андерсона в том случае, если $z = 2$. Продифференцировав уравнение, получим

$$\frac{1}{2{,}3}\frac{dK}{dv} = -2Gv + \frac{Dv^{-3/2}}{2}. \qquad (3.68)$$

При скорости v_p, при которой коэффициент проскока достигает максимума, $\frac{dK}{dv} = 0$, следовательно,

$$D = 4Gv^{5/2}. \qquad (3.69)$$

Подставив это значение D в уравнение (3.67), получим

$$2 - \lg K = G\left(v^2 + 4v_p^{5/2} v^{-1/2}\right) + I. \qquad (3.70)$$

Если построить кривую зависимости 2 — lg K от многочлена, стоящего в скобках, то должна получиться прямая линия. Значение I устанавливают по отрезку, отсекаемому на координатной оси, а G и D рассчитывают по тангенсу угла наклона прямой. Затем определяют γ_m для каждого механизма фильтрации: инерционного — 2,36 Gv^2, диффузионного — 2,3 $Dv^{-1/2}$ и зацепления — 2,3I.

На рис. 3.11 и 3.12 показана кривая зависимости коэффициентов проскока от скорости, полученная Рамскиллом и Андерсоном для фильтра марки J, и прямая, построенная на основе этой кривой, с использованием уравнения (3.70). Результаты этих исследований

можно проанализировать также с помощью уравнения, в котором диффузия зависит от $v^{-2/3}$. При этом полученные значения γ_m для каждого механизма не очень сильно отличались бы от тех значений, которые были вычислены при допущении зависимости диффузии от $v^{-1/2}$.

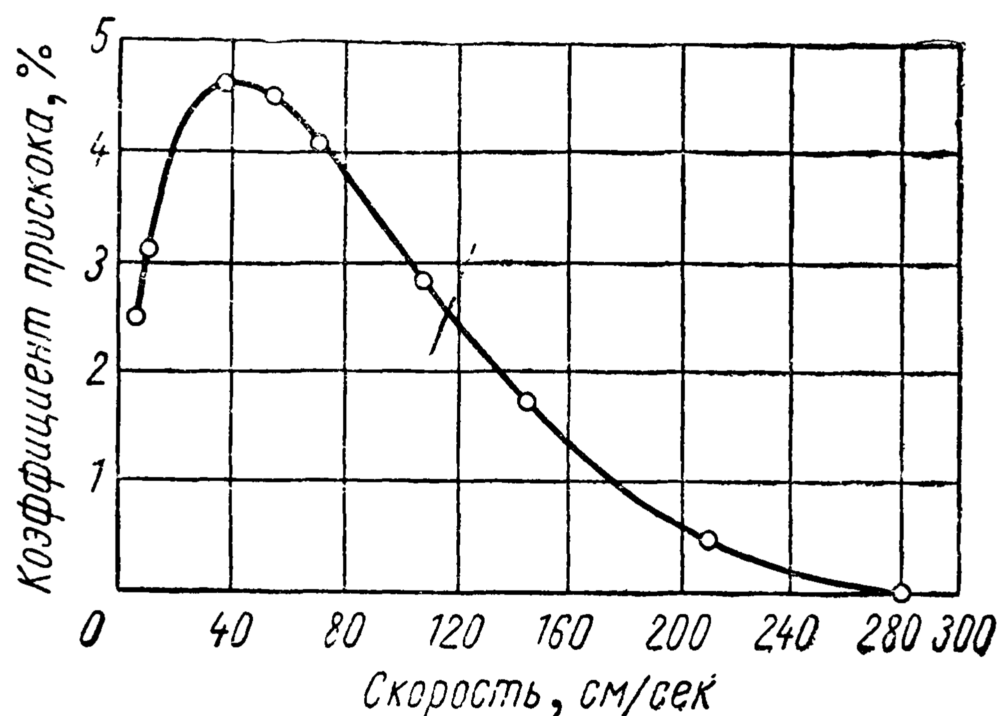


Рис. 3.11. Зависимость коэффициента проскока от скорости для бумажного фильтра.

Последняя работа Дормана и Сергисона [43], посвященная прониканию частиц диоктилфталата через стекловолокнистые фильтры с волокнами диаметром 1—10 *мкм* (содержание волокон диаметром <2,8 *мкм* составляет 50%), с плотностью упаковки от 0,01 до 0,07, показала, что диффузия оказывает влияние на осаждение частиц диаметром 1 *мкм*. Коэффициент проскока, измеренный фотометрическим методом по интенсивности рассеянного вперед света, увеличивается при более низких скоростях потока и начинает уменьшаться при скоростях порядка 10 *см/сек*.

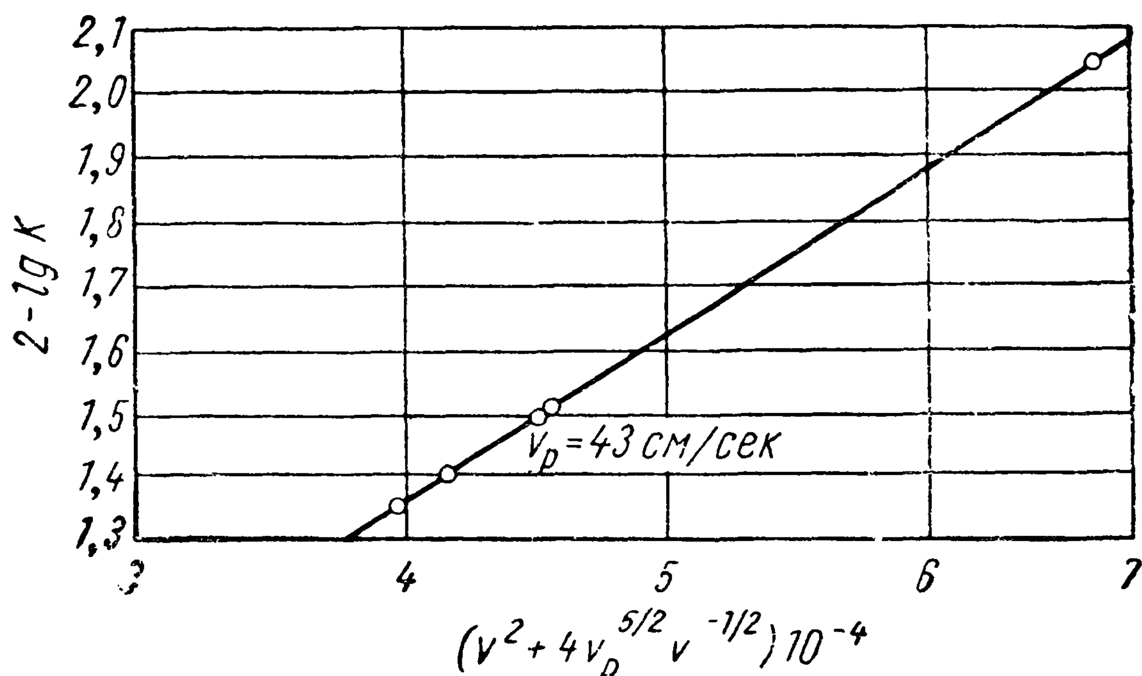


Рис. 3.12. Кривая, построенная в соответствии с уравнением (3.70).

Томас и Леппл [44] выполнили эксперименты на стеклянных волокнах различного размера (диаметры волокон, рассчитанные по величине средней удельной поверхности, лежали в пределах от 2 до 30 *мкм*), используя аэрозоли с переохлажденными частицами диаметром около 3 *мкм*. Плотность упаковки находилась в пределах от 0,006 до 0,06, а скорость изменялась от 1 до 600 *см/сек*. Они построили графики зависимости γ_e для инерционного параметра K и параметра диффузии $\Delta/2vr_f$ для волокон различного диаметра. Полу-

ченные кривые сближались при высоких значениях инерционного или диффузионного параметров, т. е. тогда, когда один из механизмов осаждения становился преобладающим.

Затем Томас и Леппл построили кривую, которая являлась асимптотой для целого ряда экспериментальных результатов, полученных при высоких значениях K и при $r_p/r_f = 0$. Эта кривая начиналась с инерционного параметра $K = 0{,}54$, так как при меньших значениях K, согласно Лэнгмюру, при отсутствии осаждения вследствие диффузии и зацепления улавливания частиц не происходит. Величина угла наклона указывает на то, что показатель фильтрации за счет инерции γ_e почти пропорционален v^2, хотя Томас и Леппл на это не указывают. Рассматривая области диффузионного осаждения и полагая, что показатель фильтрации вследствие диффузии можно представить в виде $\gamma_e = \alpha\left(\frac{\Delta}{2vr_f}\right)^n$, они провели линию асимптоту к их экспериментальным кривым, для которой $a = 0{,}87$ и $n = 1/2$. Однако они считали, что для этой ограничивающей кривой можно использовать $n = 2/3$, если значение коэффициента a будет находиться между 2 и 3. Было установлено определенное соответствие полученных результатов диффузионной теории Лэнгмюра, хотя величины γ_e почти в три раза превышали значения, предложенные Лэнгмюром.

Уонг и др. [45] оценивали проникание монодисперсных аэрозолей с частицами диаметром от 0,4 до 1,3 *мкм* через стекловолокнистые фильтры с плотностью упаковки от 0,045 до 0,098 при средних размерах волокон 3,51, 6,24 и 9,51 *мкм*. Коэффициенты проскока определялись весовым методом. Авторы работали при числах Рейнольдса от 0,038 до 1,39 и считали, что в этом случае диффузионным осаждением можно пренебречь. Их экспериментальные данные позволили установить критическое значение K, ниже которого влияние инерции становится незначительным. Точное значение K определить было трудно, но вероятнее всего оно равно $\sim 0{,}32$. В то время как Рамскилл и Андерсон считали, что при $K = 0{,}56$ влияние инерции становится незначительным, Уонг и др. полагали, что при таком значении K инерционный эффект уже начинает становиться преобладающим фактором в осаждении. Кривые Уонга и др. для γ_e при $Re = 0$ были намного ниже, чем кривые, рассчитанные по уравнениям Девиса при $Re = 0{,}2$. Уонг и др. пришли к выводу, что Девис переоценил взаимодействие волокон. Их предположение, что влияние диффузии было незначительным и что его можно не принимать в расчет, оправдано только для высоких значений Re. Для более низких значений Re и мелких частиц оно, вероятно, ошибочно и ведет к завышению γ_e.

Коэффициент проскока и плотность упаковки

Исследование влияния плотности упаковки на эффективность улавливания было проведено Ченом [9]. Он определял коэффициенты проскока через слои стеклянных волокон с одинаковым диаметром

с плотностью упаковки от 0,015 до 0,08, используя монодисперсные аэрозоли и определенную скорость. Эффективность осаждения на одиночном волокне γ_e при плотности упаковки β определялась из уравнения, аналогичного уравнению (3.27). Затем строились кривые зависимости эффективности от соответствующих значений β. Чен ставил опыты с таким расчетом, чтобы в каждой серии опытов один из механизмов фильтрации можно было считать преобладающим.

Полученные данные характеризовались довольно значительным разбросом, Чен объяснял это неоднородностью волокнистых слоев и аэрозольных частиц. Но на основе даже таких данных Чену все же удалось вывести следующее уравнение:

$$\gamma_{e\beta} = \gamma_{e0}(1 + K\beta). \qquad (3.71)$$

Он установил, что при любом преобладающем механизме осаждения значение $K = 4,5$ почти не изменяется.

Дорман и Сергисон [43] провели сравнение эффективностей осаждения частиц для трех механизмов улавливания при различных плотностях упаковки и при постоянной скорости 20,5 *см/сек*. Исходя из коэффициентов проскока стекловолокнистых слоев с плотностью упаковки от 0,01 до 0,07, определенных по частицам диоктилфталата диаметром 1 *мкм*, они оценили влияние каждого механизма, использовав уравнения, аналогичные уравнению (3.67), причем для диффузионного осаждения принималось $v^{-2/3}$; эффективность осаждения отдельными волокнами не определяли, а рассчитывали γ_m для фильтров с различными значениями β. Полученные результаты позволили вывести следующие уравнения:

Для эффектов инерции $\gamma_{m\beta} = \gamma_{m0}(1 + 110\beta)$, (3.72)

диффузии $\gamma_{m\beta} = \gamma_{m0}(1 - 4\beta)$, (3.73)

зацепления $\gamma_{m\beta} = \gamma_{m0}(1 + 30\beta)$. (3.74)

Изменение γ_m для эффекта зацепления с изменением β, установленное экспериментально, довольно хорошо совпадает с данными, рассчитанными по уравнению Лэнгмюра.

По теории Лэнгмюра γ_m для эффекта зацепления изменяется пропорционально $\Delta P/v$, где ΔP — сопротивление фильтра, v — средняя скорость воздуха внутри фильтра. По этой же теории для фильтров отношение γ_m при $\beta = 0,01$ к γ_m при $\beta = 0,07$ равно 0,46, а эксперименты показали, что это отношение равно 0,41.

Эффективность осаждения и концентрация пыли

Теория фильтрации не учитывает изменения эффективности улавливания частиц с изменением их концентрации. Действительно, изменение коэффициента проскока нельзя установить до тех пор, пока количество частиц в единице объема не станет настолько значительным, что произойдет заметная коагуляция еще до поступления

аэрозоля в фильтр. Однако такие большие концентрации наблюдаются крайне редко при практическом применении высокоэффективных волокнистых фильтров. Наличие коагуляции в аэрозолях обычно ведет к повышению эффективности улавливания вследствие укрупнения частиц. Однако в аэродисперсных системах с высокой счетной концентрацией субмикронных частиц (размером порядка 0,2 *мкм* и меньше) в результате коагуляции могут образовываться более крупные частицы, обладающие максимальным проскоком. Поэтому целесообразно рассмотреть некоторые вопросы кинетики коагуляции.

В теории коагуляции Смолуховского [46, 47] принято допущение, что каждая частица имеет эффективный радиус коагуляции S (сфера поглощения). Допустим, что в единице объема дисперсной системы содержится n одинаковых частиц радиусом r и что слияние или слипание частиц происходит при соприкосновении поверхностей сфер радиусом S. Тогда, согласно теории Смолуховского, можно написать

$$-\frac{dn}{dt} = 4\pi\Delta S n^2. \qquad (3.75)$$

Коэффициент диффузии частиц Δ определяется уравнением

$$\Delta = \frac{RT}{6\pi\eta rN}\left(1 + \frac{A\lambda}{r}\right), \qquad (3.76)$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; η — вязкость газа; N — число Авогадро; $\left(1 + \frac{A\lambda}{r}\right)$ — поправка Кеннингема, в которой A — константа, для малых частиц по расчетам Милликена [48] равная примерно 0,9; λ — средняя длина пути свободного пробега молекул. Если учесть, что радиус S фактически равен радиусу частицы, то после интегрирования получим

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = \frac{4RT}{3\eta N}\left(1 + \frac{A\lambda}{r}\right)t. \qquad (3.77)$$

Взяв за основу это уравнение, Ламер и др. [49] определили продолжительность периода снижения первоначальной счетной концентрации вдвое (табл. 3.10).

Таблица 3.10

Время снижения счетной концентрации вдвое

Радиус частиц, *мкм*	Количество частиц в 1 *см*³	Время, *сек*
0,05	10^7	100
0,05	10^8	10
0,01	10^8	3

Из уравнений следует, что с увеличением степени монодисперсности аэрозолей скорость коагуляции уменьшается, а увеличение температуры вызывает рост скорости коагуляции. Экспериментальные данные по определению скорости коагуляции дают завышенные значения по сравнению с теоретическими. Это связано, по-видимому, с тем, что силы Ван дер Ваальса как бы увеличивают радиус частиц, эффективный для коагуляции.

Влияние процессов коагуляции на тонкодисперсные аэрозоли иллюстрируется данными табл. 3.6, из которых следует, что выдержка аэрозолей привела к увеличению размера частиц и последующему заметному росту коэффициента проскока частиц через фильтр.

Влияние пылевой нагрузки на коэффициент проскока и сопротивление фильтра

По мере накопления в фильтре осадка из твердых частиц эффективность фильтра возрастает, так как расстояния между волокнами уменьшаются и площадь поверхности фильтрующих элементов (волокон и уловленных частиц) становится больше.

Этот процесс протекает значительно интенсивнее в фильтрах, снаряженных подобными бумаге материалами, и медленнее при использовании толстых объемных или полуобъемных слабо уплотненных волокнистых слоев. Уловленные частицы вызывают увеличение сопротивления фильтра, хотя для некоторых фильтров характерно значительное улучшение эффективности улавливания еще до начала резкого возрастания сопротивления. Существенное значение имеет природа аэрозолей; аэрозоли с мельчайшими частицами вызывают значительно больший рост сопротивления, чем аэрозоли с более крупными частицами при одинаковом весе осадка. Следовательно, сравнительные результаты испытаний по забиваемости будут правильными только для определенных фильтров и аэрозолей.

Томас [50] на основании исследований забиваемости фильтра сажей предложил следующее уравнение:

$$t = A^{0,5} \ln \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0}\right) / KMQ^{0,5}, \qquad (3.78)$$

где t — время увеличения сопротивления от ΔP_0 до ΔP; A — площадь фильтра; K — коэффициент забивания; M — концентрация сажевого аэрозоля; Q — скорость потока. Коэффициент K зависит от характера распределения частиц сажи по размерам и природы материала.

Значительное количество экспериментов по исследованию забиваемости фильтров было выполнено в научно-исследовательском центре химической защиты с использованием полидисперсных аэрозолей твердых частиц с эквивалентным диаметром от 0,01 до 1,5 *мкм* на различных типах волокнистых фильтров. Полученные результаты показывают, что отношение $\Delta P / \Delta P_0$ зависит от объема

уловленных фильтрами частиц и не зависит от скорости потока, по крайней мере при изменении скорости в 4 раза. Аналогичная картина наблюдалась и в опытах на полидисперсных аэрозолях с медианным весовым диаметром частиц 2 *мкм*. Отдельные эксперименты с полидисперсными аэрозолями частиц метиленовой голубой и хлористого натрия при одинаковом распределении частиц по размерам показали, что возрастание сопротивления фильтра зависит от объема уловленных частиц, а различия в удельном весе (удельный вес метиленовой голубой примерно 1 *г/см*^{3}, хлористого натрия примерно 2,2 *г/см*^{3}) и в форме частиц, по-видимому, не оказывают влияния на скорость повышения сопротивления. Возможно, что все это верно для частиц, имеющих форму шара или куба, но не следует полагать, что это справедливо для частиц с иглообразной формой. В последнем случае сопротивление и эффективность фильтра растут быстрее при данном объеме уловленных в фильтре частиц.

Обычно в начальный период таких испытаний как с тонкими плотными, так и с глубокими рыхлыми слоями высокоэффективных материалов повышение сопротивления приблизительно пропорционально увеличению объема уловленных частиц, а кривая зависимости логарифма коэффициента проскока от объема уловленных частиц представляет собой почти прямую линию. Однако к концу срока службы материалов наблюдается быстрое повышение сопротивления при небольшом увеличении объема уловленных фильтром частиц.

Данные по сопротивлению, эффективности и забиванию фильтров из различных материалов приведены в гл. IV.

Аэрозоли, применяемые для испытания фильтров

Испытания фильтров желательно проводить по монодисперсным аэрозолям, чтобы, зная точные размеры частиц, можно было рассчитать эффективность. Однако в большинстве случаев при испытании фильтров используются полидисперсные аэрозоли и степень электрической заряженности этих частиц неизвестна. Вследствие этого очень часто бывает трудно сопоставлять результаты разных исследователей. При сравнительной оценке эффективностей фильтров необходимо эти данные рассматривать с учетом выбранного метода испытаний.

Из зависимости эффективности от размера частиц, которая достаточно подробно обсуждалась в этой главе, следует, что в случае применения полидисперсных аэрозолей кривая распределения частиц по размерам для аэрозоля за фильтрами имеет более резко выраженный максимум, чем соответствующая кривая для исходного аэрозоля, причем форма кривой зависит от величины коэффициента проскока, степени однородности фильтрующего материала и степени полидисперсности исходного аэрозоля. Если за испытуемым фильтром установить такой же фильтр, то он будет иметь более низкую эффективность по частицам, выходящим из первого фильтра, так как

в него будут поступать частицы, имеющие максимальный коэффициент проскока через подобные фильтрующие материалы.

При монодисперсном аэрозоле этого наблюдаться не будет, коэффициент проскока фильтров будет такой же, как у первого фильтра (при условии, что частицы не заряжены, в противном случае первый фильтр уловит сравнительно больше заряженных частиц).

Примеры испытаний. 1. Аэрозоль для испытаний содержит частицы диаметром от 0,01 до 1,5 *мкм*. Фильтрующий материал — неплотная асбестовая бумага. Коэффициент проскока по весу при $v = 4,5$ *см/сек* через два листа равен 0,3%, при тех же условиях, но через четыре листа — 0,0025% При использовании монодисперсного аэрозоля с незаряженными частицами коэффициент проскока через два листа — 0,3%, через четыре листа — 0,0009%.

2. Такой же аэрозоль, как и в первом примере. Фильтрующий материал — тонкая стекловолокнистая бумага. Коэффициент проскока по весу при $v = 13$ *см/сек* через один лист 0,1%, через два листа — 0,0005%.

Природа аэрозоля также оказывает влияние на величину коэффициента проскока. Частицы с большим удельным весом испытывают эффекты инерции при меньших диаметрах, чем частицы с малым удельным весом. В сажевом аэрозоле, хотя и содержатся в основном очень мелкие частицы, образуются агрегаты в виде цепочек, которые сравнительно легко отфильтровываются. Частицы игольчатой формы легче осаждаются в фильтре, чем сферические частицы с такой же массой. Поэтому при сообщении данных об эффективности необходимо указывать размер и природу частиц, скорость, при которой проводились испытания, степень электрической заряженности частиц и другие сведения.

В настоящее время значительный интерес представляет проблема высокотемпературной фильтрации. Кроме обычных экспериментальных трудностей для проведения испытаний при повышенных температурах требуется аэрозоль с минимальным давлением паров материала частиц при температуре испытаний. Например, при температуре выше 300° С упругость паров хлористого натрия такова, что определять коэффициент проскока методом пламенной фотометрии невозможно, хотя эта соль начинает плавиться при 800° С. В этом случае незначительное проникание пара эквивалентно коэффициенту проскока частиц в 1%.

ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Теория фильтрации имеет важное значение, так как она позволяет предвидеть влияние небольших изменений в условиях работы фильтров на коэффициент проскока. Но в отношении волокнистых фильтров теория дает в основном качественную оценку, а производство фильтрующих материалов ведется методом подбора на основе практического опыта и догадки. Если бы теория и смогла точно

предсказать коэффициент проскока частиц через идеальные фильтры, такие фильтры было бы невозможно изготовить.

Значительные успехи, достигнутые за последние несколько лет в области разработки контрольно-измерительных приборов, позволили более точно определять коэффициент проскока и размер частиц. В настоящее время можно довольно точно предсказывать эффективность некоторых волокнистых фильтров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Freundlich H. Colloid and Capillary Chemistry, 1926. Long. Methuen.
2. Ramskill E., Anderson W. J. Colloid Sci., **6**, 416 (1951).
3. Sullivan R., Hertel K. Advances in Colloid Science, 1942. N.Y. Interscience.
4. Davies C. Proc. Instn Mech. Engrs (Lond.), **1B**, 185 (1952).
5. Langmuir I. Washington, Office of Techn. Services. OSRD. Rep. No. 865 (1942).
6. Лэмб Г. Гидродинамика. М.—Л., Гостехиздат, 1947.
7. White C. Proc. Roy. Soc., **A201**, 268 (1950).
8. Iberall A. J. Res. Nat. Bur. Standards, **45**,398 (1950).
9. Чен Ч. Успехи химии, **25**, 368 (1956).
10. Davies C. Proc. Phys. Soc. (Lond.), **B63**, 288 (1950).
11. Finn R. Engng Exp. Sta. Techn. Rep. No. 8 (1953). Urbana Univ. Illinois.
12. Davies C., Peetz C. Proc. Roy. Soc., **A234**, 269 (1956).
13. Albrecht F. Phys. Z., **32**, 48 (1931).
14. Langmuir I., Blodgett K. Gen. Electr. Res Lab. Rep. No. RL-225 (Schenectady) (1944—1945).
15. Einstein A. Ann. Phys. Lpz., **19**, 371 (1906).
16. Натансон Г. «Докл. АН СССР», **112**, 21 (1957).
17. Stairmand C. Trans. Instn. Chem. Engrs. (Lond.), **28**, 130 (1950).
18. Ranz W. Engng Exp. Sta. Techn. Rep. No. 8 (1953). Urbana Univ. Illinois.
19. Grenn H., Thomas D. J. Proc. Instn. Mech. Engrs, **1B**, 203 (1952).
20. Green H., Lane W. Particulate Clouds, Dusts, Smokes and Mists, 1957. Lond., Spon.
21. Friedlander S., Pasceri R. Aerosol Filtration by Fibrous Filters, 1962. Baltimore, Dept. of Chem. Engng. The Johns Hopkins Univ.
22. Chen C. Engng Exp. Sta. Annual Rep., 1954, Urbana Univ. Illinois.
23. Wong J., Johnstone H. Engng Exp. Sta. Techn. Rep. No. 11 (1953). Urbana Univ. Illinois.
24. Walton W. 1943 (не опубликовано).
25. Green H. 1927 (не опубликовано).
26. La Mer V. AEC Rep. NYO-512, 1951. Oak Ridge, Tennessee; Techn. Inform. Service.
27. Lane W. et al. 1953 (не опубликовано).
28. Sinclair D., La Mer V. Chem. Rev., **44**, 245 (1949).
29. Torgesen W. A Study of Filtration Mechanisms, 1961. Minneapolis, Gen. Mills.
30. Friedlander S. Industr. Engng Chem., **30**, 1161 (1958).
31. Gillespie T. J. Colloid Sci., **10**, 266, 299 (1955).
32. Thomas D., Harris W. 1952 (не опубликовано).
33. Darlow H. 1960 (не опубликовано).
34. Dorman R. 1961 (не опубликовано).
35. Dyment J. et al. 1963 (не опубликовано).
36. Fitzgerald J., Detwiler G. Amer. Industr. Hyg. Assoc. Quart., **18** (1), 57 (1957).

37. Fitzgerald J., Detwiler G. Arch. Industr., Health, **15**,3 (1957).
38. Megaw W., Wiffen R. 1963 (не опубликовано).
39. Lindekin G. et al. Hasards Control Quart. Rep. No. 6 (1961). Univ. of California.
40. Terjesen S., Cherry G. Trans. Instn Chem. Engrs (Lond.), **25**, 89 (1947).
41. Sergison P. 1960 (не опубликовано).
42. Dorman R. Aerodinamic Capture of Particles. P. 112, 1961. Oxford, Pergamon Press.
43. Dorman R., Sergison P. 1962 (не опубликовано).
44. Thomas D., Lapple C. J. Chem. Engng, 7, 2, 203 (1961).
45. Wong J. et al. Appl. Phys., **27**, 161 (1956).
46. Smoluchowski M. von. Phys. Z., **17**, 537, 585 (1916).
47. Smoluchowski M. von. Z. Phys. Chem., **92**, 129 (1917).
48. Millikan R. Phys. Rev., **22**, 1 (1923).
49. La Mer V. et al. J. Colloid Sci., **5**, 471 (1950).
50. Thomas D. J. Instn. Heat. and Ventilat Engrs, **20**, 35 (1952).

Глава IV

ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Высокоэффективные аэрозольные фильтры должны изготовляться из тонких волокон в виде объемных слоев или тонких листов. Для получения таких волокон можно использовать большое количество материалов, однако на практике часто возникают различные обстоятельства, ограничивающие возможности выбора материала. Следует учитывать, что ни один тип волокон не может быть универсальным. Фильтрующий материал, показывающий высокую эффективность при улавливании частиц размером в несколько микрон, может оказаться совершенно непригодным для осаждения частиц размером 0,5 *мкм* и меньше. Вследствие того что реальные аэрозоли весьма полидисперсны, обычно приходится применять последовательно два фильтра: первый из более грубых волокон для осаждения крупных частиц, второй, высокоэффективный, для очистки от самых мелких частиц. В этой главе описаны свойства некоторых материалов, которые уже применяются или могут с успехом применяться в промышленных фильтрах.

ВАЖНЕЙШИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Фильтрующие материалы кроме выполнения своей основной функции по улавливанию аэрозольных частиц должны:

а) иметь низкое аэродинамическое сопротивление;

б) занимать возможно меньший объем;

в) быть прочными на разрыв и не разрушаться в местах изгибов;

г) быть дешевыми;

д) иметь высокую пористость (это обеспечивает большую пылеемкость).

Для фильтров специального назначения желательны также хорошая термостойкость и огнестойкость, устойчивость в агрессивных средах и достаточная влагостойкость.

Однако качество волокнистых материалов нельзя рассматривать без учета проблем удобного размещения материала внутри корпуса

фильтра (см. гл. V). Незначительные утечки между корпусом и фильтрующей средой могут настолько снизить качество готовых образцов, что места негерметичности будут определять их общую эффективность.

Взаимозависимость основных параметров

Взаимозависимость некоторых характеристик иллюстрируют следующие примеры. Сопротивление фильтра можно снизить, если уменьшить толщину слоя или листа. Но в этом случае аэрозоль будет проходить более короткий путь в слое волокон, и частицы будут проникать в большей степени. В то же время при этом уменьшится прочность среды.

Очевидным путем снижения сопротивления фильтра является увеличение в нем рабочей поверхности материала, что позволяет уменьшить сопротивление приблизительно пропорционально изменению скорости. Увеличение же фильтрующей поверхности ведет к увеличению объема фильтра, его стоимости и, вероятно, вызовет трудности в герметизации материала в корпусе, но уменьшит скорости забивания. В то же время при уменьшении скорости высокоэффективная среда будет иметь меньший коэффициент проскока по субмикронным аэрозолям.

Эти примеры относятся к тем случаям, когда изменение какого-либо одного параметра вызывает изменение других. Ниже мы рассмотрим прямое влияние только на определенные характеристики.

Сопротивление и лобовая скорость. Анализ экспериментальных данных показывает, что ΔP приблизительно выражается соотношением

$$\Delta P = Av + Bv^2, \tag{4.1}$$

где ΔP — сопротивление; v — лобовая скорость; A и B — константы ($A \gg B$).

При низких скоростях, обычных для высокоэффективной фильтрации, величина второго члена чаще незначительна, так что уравнение (4.1) может быть записано в виде

$$\Delta P = Av. \tag{4.2}$$

Коэффициент проскока и скорость. Коэффициенты проскока монодисперсных аэрозолей растут с увеличением скорости, так как диффузионное осаждение становится менее эффективным; затем они достигают максимального значения, а при дальнейшем возрастании скорости снова уменьшаются в связи с тем, что роль инерционного осаждения становится более существенной. Скорость потока аэрозоля, соответствующая максимальному коэффициенту проскока, зависит от характеристики частиц и волокон и плотности упаковки слоя.

В случае полидисперсных аэрозолей, используемых для испытания высокоэффективных фильтров, например метиленовой голубой

или хлористого натрия (максимальный размер частиц около 1,5 *мкм*, 50% частиц по весу имеют размеры более 0,6 *мкм* и 50% частиц по счету — менее 0,1 *мкм*), коэффициент проскока при увеличении скорости от 0 до 20 *см/сек* постоянно возрастает и начинает уменьшаться только при очень высокой скорости, когда сопротивление возрастает до недопустимой величины. Чем выше качество фильтрующего материала, тем более резко выражено изменение коэффициента

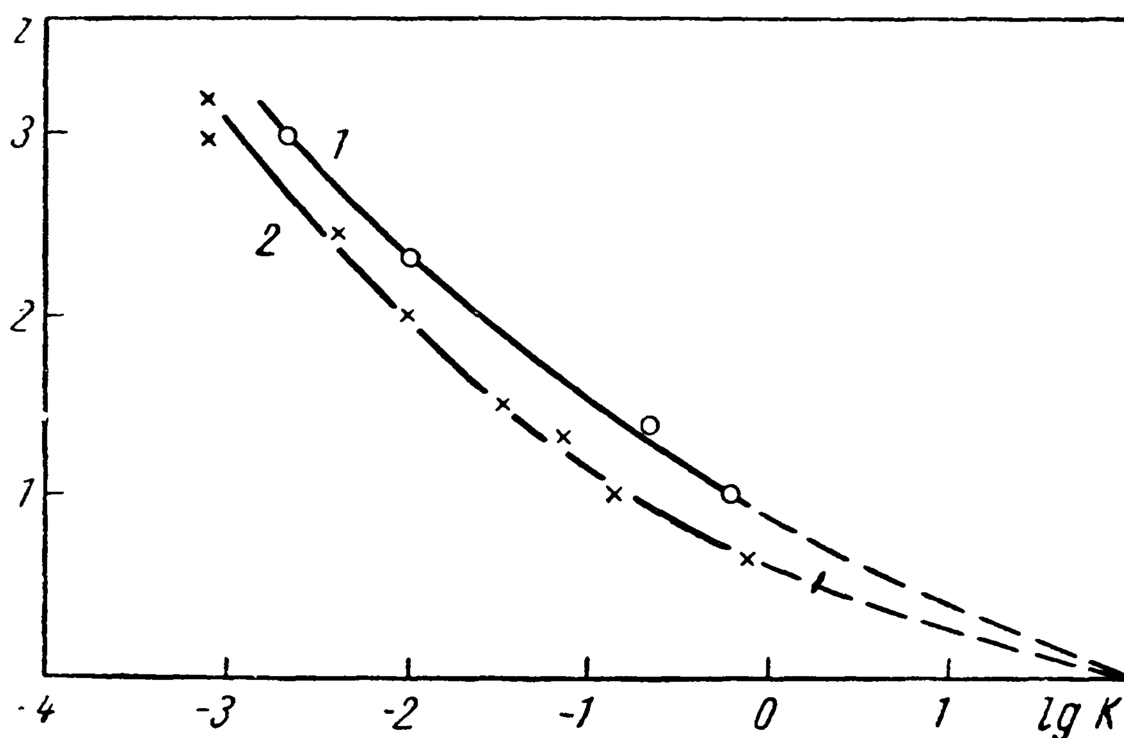


Рис. 4.1. Зависимость величины z от коэффициента проскока (скорость потока 4,5 *см/сек*):
1 — шерстяно-смоляные фильтры; 2 — бумажные фильтры, хлопко-асбестовый слой.

проскока с изменением скорости. Для ориентировочной оценки коэффициента проскока с изменением скорости в 2—3 раза можно воспользоваться следующим уравнением:

$$K = k_1 v^z, \tag{4.3}$$

где K — коэффициент проскока, %; k_1 — константа; z — величина, являющаяся функцией K. Характер изменения z для некоторых материалов на основе опытных данных показан на рис. 4.1.

Уравнение (4.3) неприменимо для аэрозолей с частицами размером более 3 *мкм*, когда с ростом скорости вместо ожидаемого увеличения K будет происходить его снижение, так как инерционный эффект для таких частиц становится значительным даже при низких скоростях потока. Таким образом, при последовательном размещении двух фильтров первый будет улавливать крупные частицы, а следующий будет служить для завершающей очистки. Очевидно, высокие скорости целесообразно применять на первой ступени и низкие на второй.

Коэффициент проскока и сопротивление. Если изменение в сопротивлении достигается за счет увеличения толщины слоя при постоянной плотности упаковки или числа слоев фильтрующего материала, то из основного закона фильтрации $n = n_0 e^{-\gamma}$ следует, что зависимость логарифма коэффициента проскока для монодисперс-

ного аэрозоля от сопротивления выражается прямой линией (рис. 4.2). В случае стандартного полидисперсного аэрозоля хлористого натрия кривая также представляет собой почти прямую линию.

Когда увеличение ΔP достигается вследствие непрерывного уплотнения слоя материала с определенным весом, то эта зависимость не является линейной: увеличение ΔP сопровождается меньшим изменением коэффициента проскока.

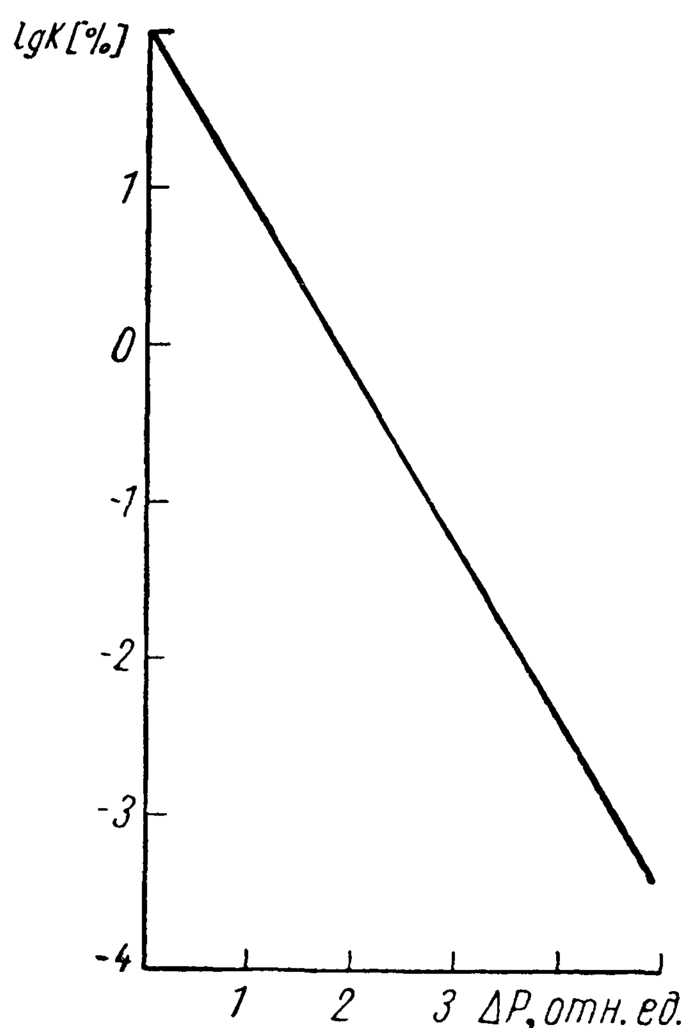


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента проскока от перепада давления на фильтрующем материале.

Вероятно, более важным для практики является соотношение между фракционным коэффициентом проскока частиц и сопротивлением фильтра, выражающееся следующим образом:

$$Q = \frac{-100 \lg K_f}{\Delta P}, \qquad (4.4)$$

где Q — коэффициент фильтрующего действия (большее значение указывает на лучший материал); K_f — фракционный коэффициент проскока, %; ΔP — сопротивление. Скорость воздуха и размер частиц должны оставаться постоянными для каждой серии сравнительных испытаний.

Сопротивление и объем уловленных частиц. Осажденные частицы увеличивают сопротивление фильтра; это увеличение вначале происходит медленно, но при достижении определенной стадии, время наступления которой зависит от характеристик фильтра и частиц, сопротивление начинает возрастать особенно резко. Фильтрующий материал в значительной степени забивается, и его следует заменять. Материалы с высокой плотностью упаковки и материалы, состоящие из тонких волокон, забиваются быстрее, причем частицы игольчатой формы способствуют этому больше, чем частицы, форма которых близка к сферической. Мелкие частицы оказывают намного более интенсивное воздействие, чем крупные. Например, у фильтрующей бумаги, имеющей коэффициент проскока 80% по частицам размером 0,5 *мкм*, увеличение сопротивления достигло 150 *мм вод. ст.* при накоплении 0,1 $см^2$ твердых полидисперсных частиц с медианным весовым размером 0,6 *мкм*, в то время как для частиц размером 8 *мкм* оно составило 10 $см^3$. В последнем случае пыль накапливалась на поверхности фильтра и очень слабо проникала внутрь материала. Поперечный разрез листа фильтрующей бумаги (рис. 4.3) показывает характер проникания тонких частиц в глубину; на рис. 4.4 приведен снимок осадка частиц метиленовой голубой на стеклянных волокнах.

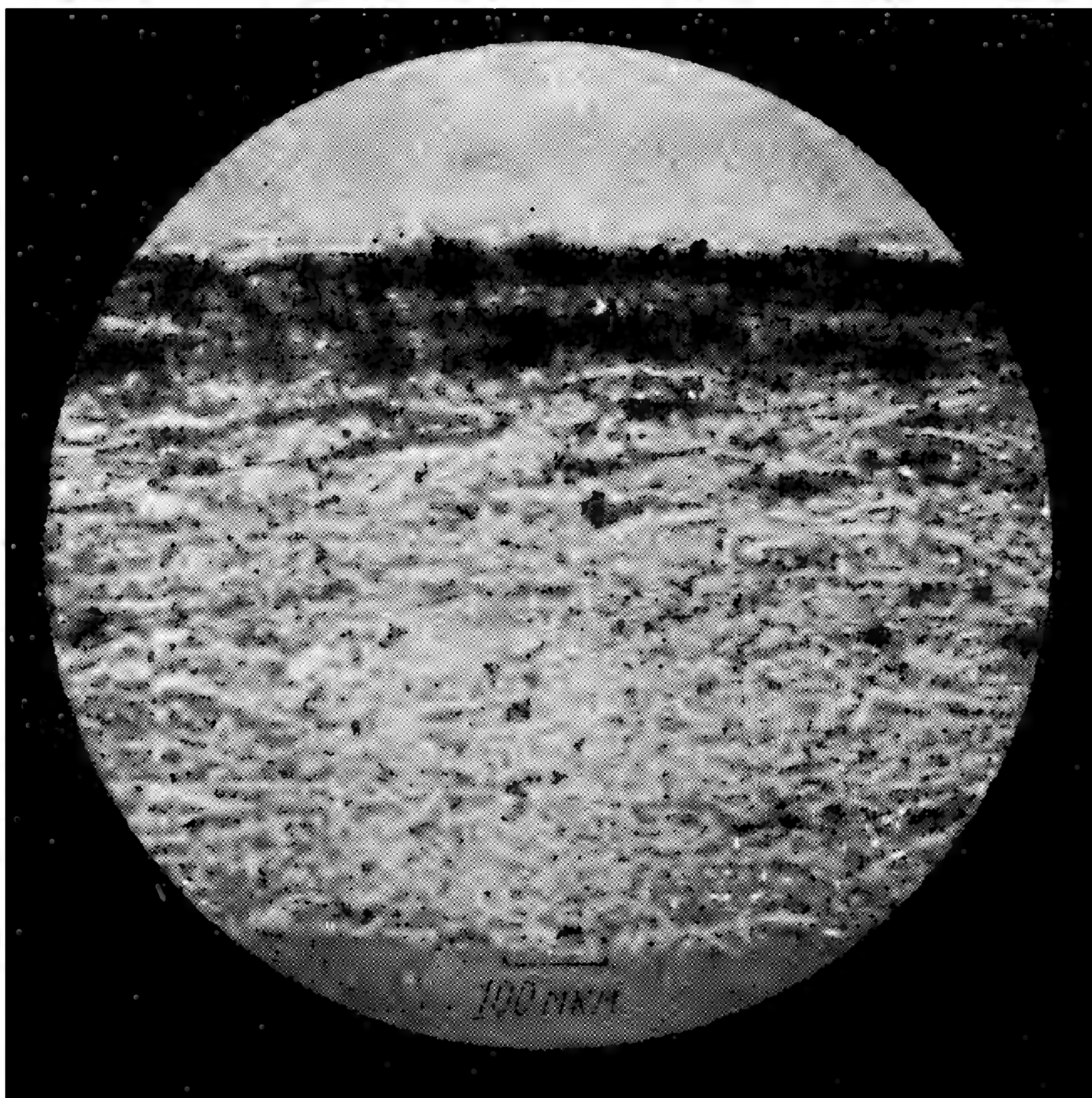


Рис. 4.3. Поперечный разрез фильтрующей бумаги.

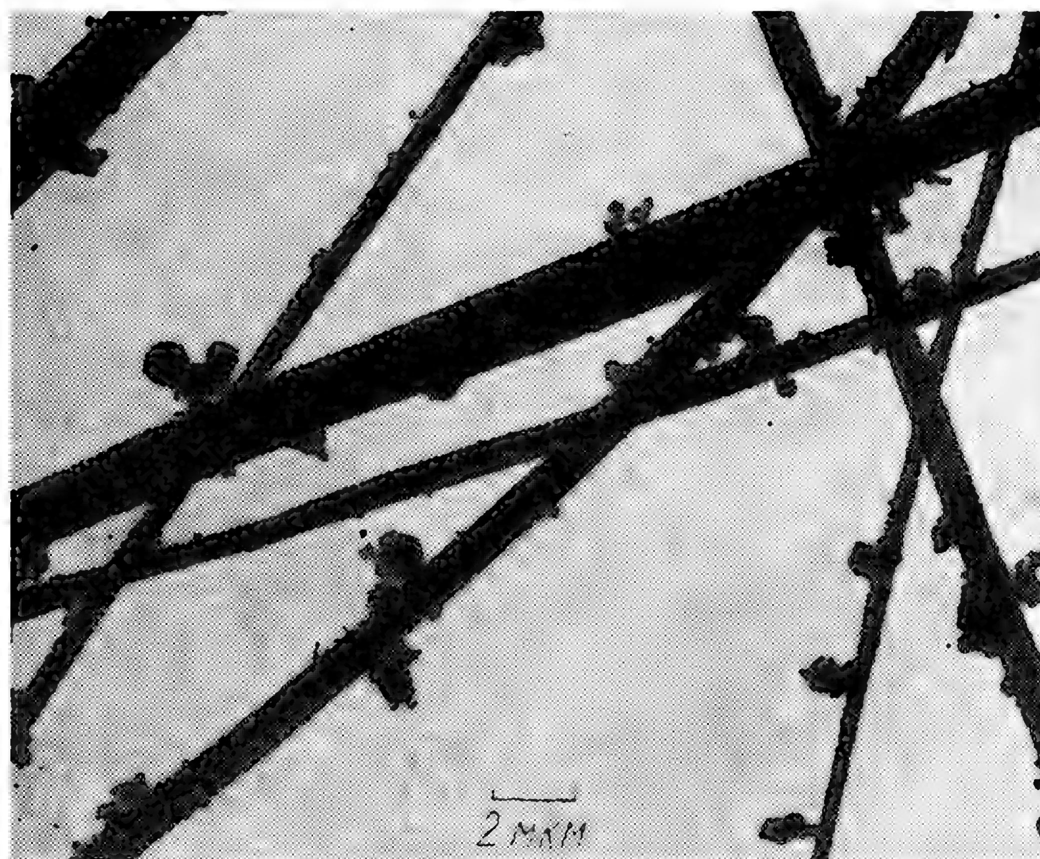


Рис. 4.4. Частицы метиленовой голубой, уловленные стеклянными волокнами (электронный микроскоп).

Коэффициент проскока и объем осадка. По мере накопления частиц на волокнах эффективность фильтра возрастает. Изменение коэффициента проскока с увеличением объема осадка зависит от материа-

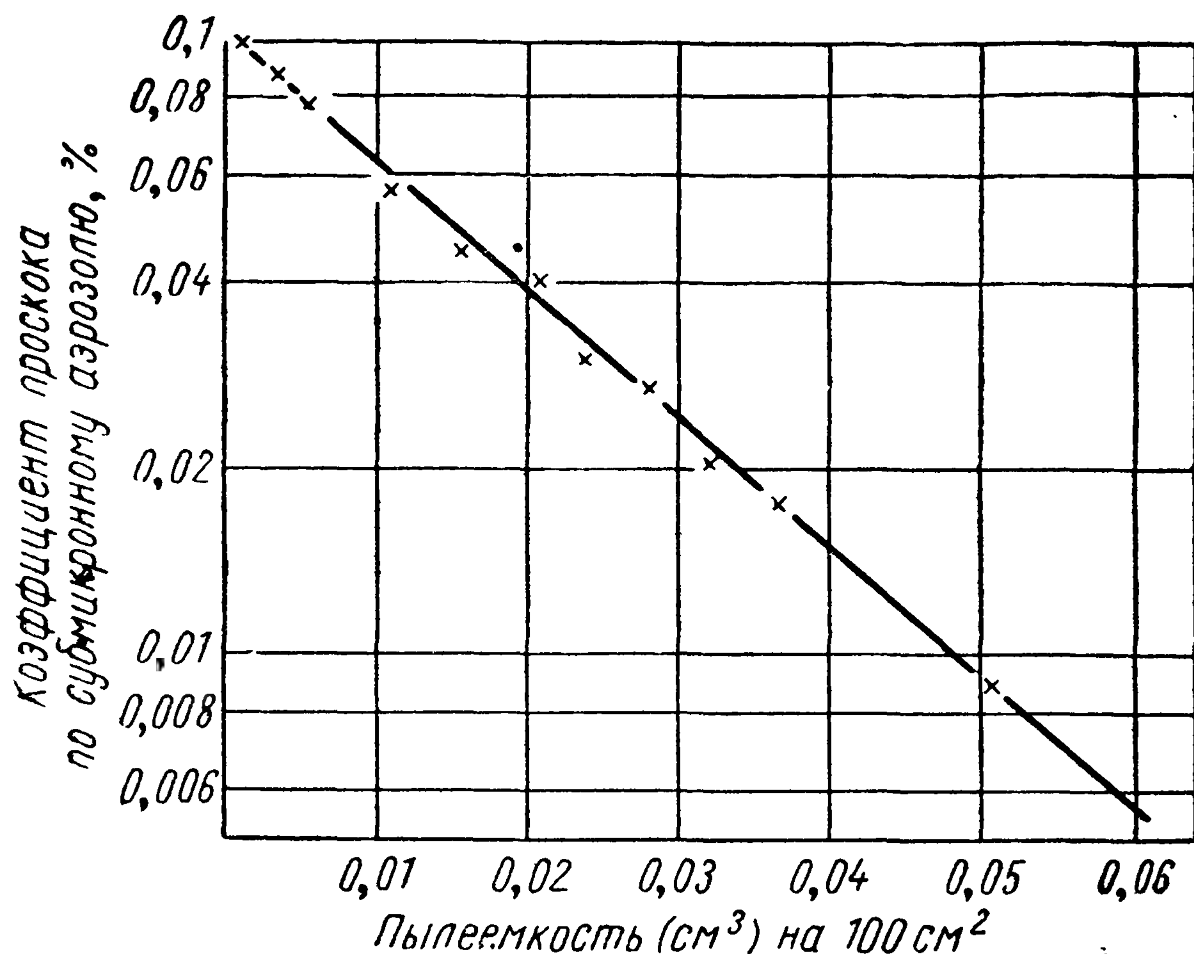


Рис. 4.5. Зависимость коэффициента проскока от объема осажденных твердых частиц на шерстяно-асбестовом фильтре.

ла фильтра (плотности упаковки и диаметра волокон), а также от размера частиц. На рис. 4.5 и 4.6 показана зависимость коэффициента проскока и перепада давления от объема накопленного осадка твер-

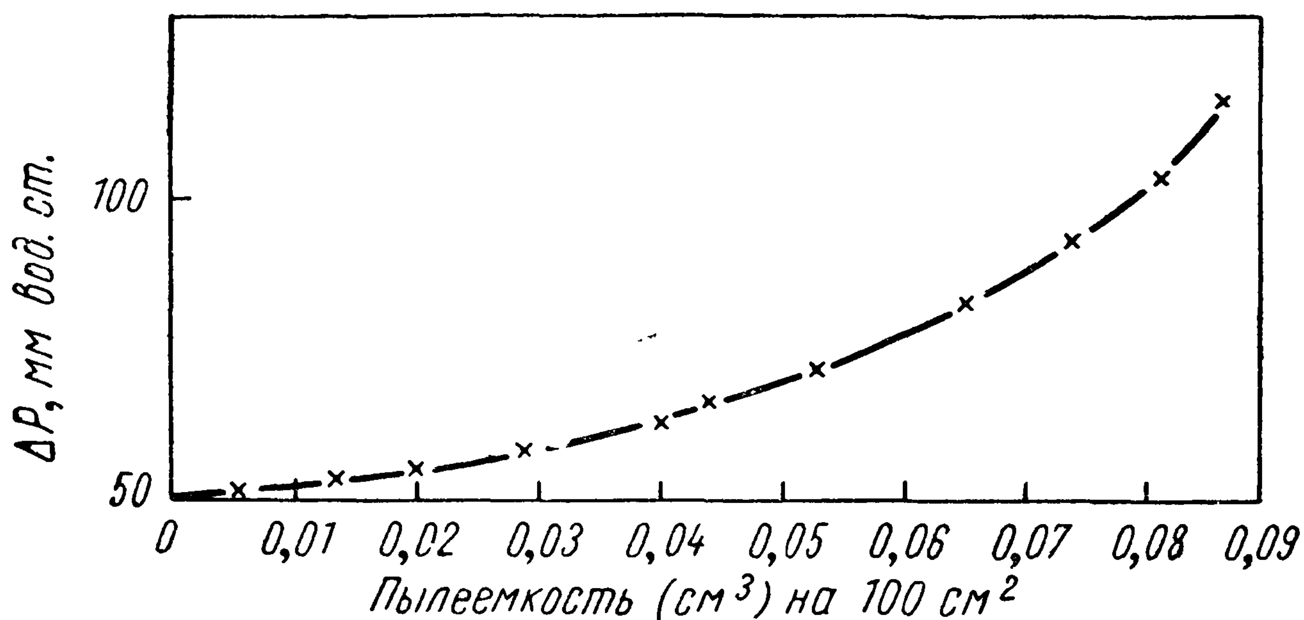


Рис. 4.6. Зависимость перепада давления от объема осажденных твердых частиц на шерстяно-асбестовом фильтре при лобовой скорости 8,5 *см/сек*.

дых частиц; забивающий аэрозоль (стандартный аэрозоль хлористого натрия) одновременно служил и для определения коэффициента проскока.

Иногда наблюдается очень резкое увеличение эффективности при чрезвычайно малом изменении ΔP. Например, фильтрующая

бумага с $K = 0{,}5\%$ и $\Delta P = 25$ *мм вод. ст.* после кратковременного забивания стандартным аэрозолем метиленовой голубой показала конечный проскок 0,02% при увеличении ΔP всего на 2,5 *мм вод. ст.*

Жидкие частицы, вызывая рост сопротивления, могут привести к увеличению коэффициента проскока. Это объясняется тем, что силы поверхностного натяжения жидкостей стягивают волокна в пучки, нарушая структуру.

Жидкие частицы могут также нейтрализовать на волокнах заряды, которые возникают при фильтрации.

Типовые значения характеристик

Почти невозможно указать какие-либо стандартные значения ΔP, K и пылеемкости ни для предфильтров, ни для конечных фильтров; они различны в разных ситуациях. Однако при обычном использовании в промышленности нормальное сопротивление предфильтров меньше 12,7 *мм вод. ст.*, а замыкающего фильтра в два раза выше при номинальной скорости. Скорость воздуха через материалы предфильтров колеблется в пределах от 5 до 20 *см/сек*, а через фильтрующие материалы конечной очистки от 2 до 10 *см/сек*. Предфильтр обычно заменяется при возрастании ΔP до 100 *мм вод. ст.*, а конечный фильтр при увеличении ΔP до 75—100 *мм вод. ст.* Коэффициенты проскока материалов предфильтров в высокоэффективных комбинированных установках лежат в пределах от 5 до 60% (по частицам диаметром 0,5 *мкм*), в то время как в замыкающем фильтре материал должен иметь коэффициент проскока не более 0,001% при наличии в аэрозоле не более 1% таких частиц.

Строгого и точного определения термина высокой эффективности пока нет. По мнению автора, в качестве высокоэффективных материалов должны рассматриваться материалы, имеющие максимальный коэффициент проскока 1% по аэрозолям метиленовой голубой, хлористого натрия (с аналогичным распределением частиц по размерам) или по туману диоктилфталата. Однако в этой главе речь идет об использующихся в реальных фильтрах материалах с коэффициентом проскока выше 1%. Эти материалы наиболее экономичны в работе.

Размещение материалов в промышленных фильтрах

Набивки, насадки. Волокнистые рыхлые прокладки (маты) или набивные объемные слои могут использоваться в виде плоских фильтров. В этой простейшей форме края материалов зажимаются фланцами корпуса или уплотняются кольцами так, чтобы не было утечек по краям. Иногда фильтры изготовляют путем обвертывания в 2 или 3 раза перфорированного цилиндра, причем поток газа обычно направлен от периферии к центру. Производительность фильтра ограничивается площадью поверхности и допустимым сопротивле-

нием; такие фильтры обычно применяются там, где требуются небольшие производительности, например в противогазах.

Складчатые слои. Площадь фильтрующей поверхности внутри определенного объема фильтра может быть значительно увеличена путем использования складчатых конструкций. На волокнистые

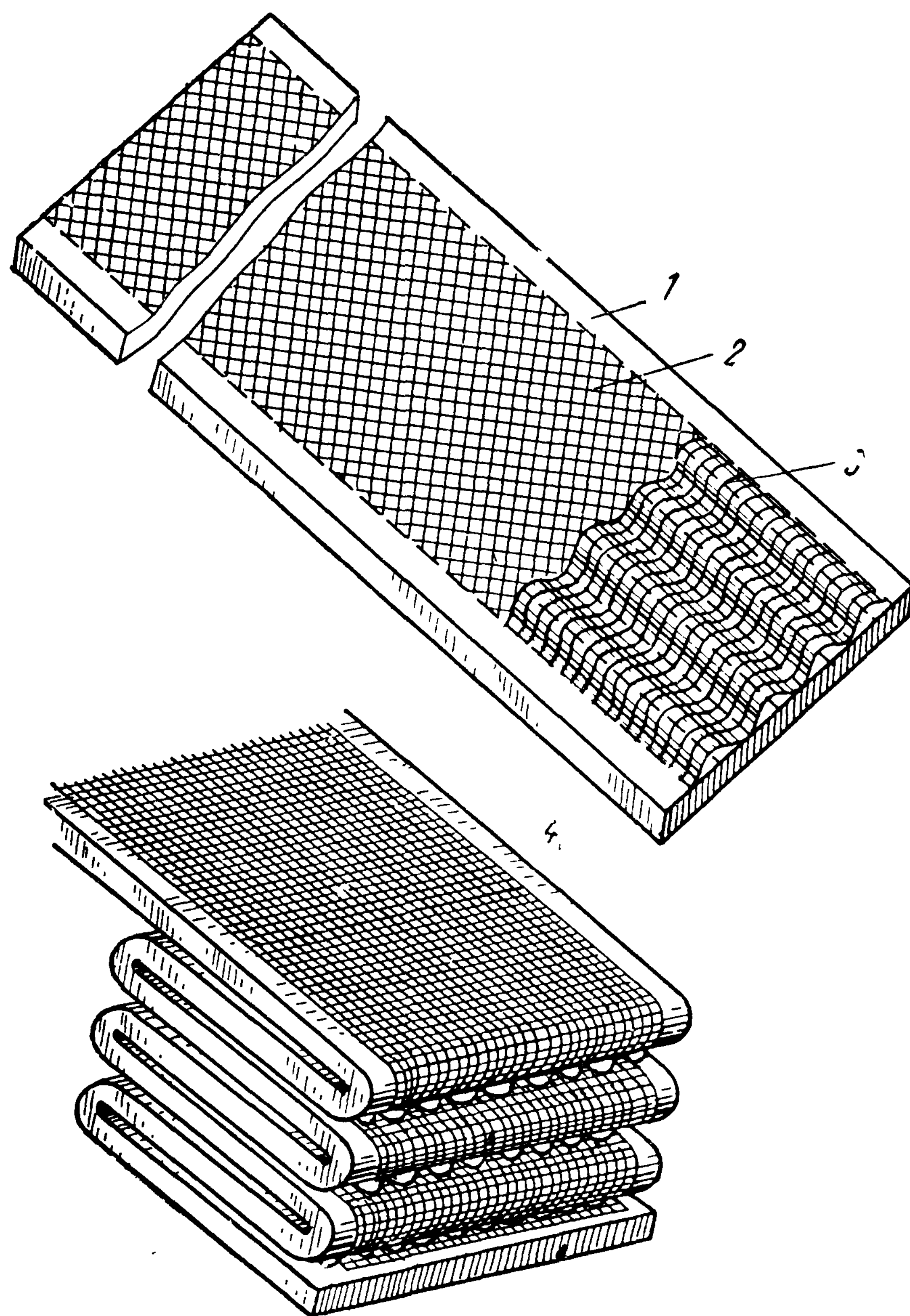


Рис. 4.7. Способ укладки рыхлого слоевого материала:

1 — фильтрующий материал; *2* — муслин; *3* — гофрированный разделитель; *4* — складчатый фильтр.

слои с обеих сторон обычно накладывается муслин (канва, марля или другая легкая прокладочная ткань), а гофрированные разделители в каждой складке образуют каналы для прохода воздуха, причем на краях остается полоса фильтрующего материала без муслина (рис. 4.7).

Герметизирующих адгезивов обычно не требуется; слои уплотняются в корпусе сжатием; рыхлый (хлопьевидный) материал легко принимает новую форму и опасности утечек по краям почти не существует. Хотя сопротивление в расчете на единицу поверхности в таких фильтрах несколько больше, чем на нескладчатых слоях

из-за сопротивления каналов между разделителями, складки всегда служат простым и надежным средством увеличения производительности фильтров с относительно малыми объемами корпусов.

Гофрированные бумаги. Бумагу можно использовать в виде плоских листов, однако обычно ее применяют в гофрированной форме. Герметизация краев в этом случае является более трудной проблемой, чем при использовании складчатых объемных слоев.

Пористая керамика. Эти материалы не могут конкурировать с объемными слоями или бумагами применительно к очистке воздуха. Они используются обычно в специальных случаях в виде полых цилиндров. Фильтры могут набираться из плоских элементов.

Глубокие слои. В определенных случаях (если позволяет место) могут оказаться полезными слои грубых зернистых материалов (например, песок или кокс) толщиной до 180 *см*.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА О РАЗВИТИИ ФИЛЬТРОВ

О вредном и неприятном воздействии пылей известно очень давно. Еще римские горняки пользовались примитивными респираторами из тканей или мешковины. В XIX в. с развитием промышленности интерес к этой проблеме возрос, так как опасность некоторых видов пылей стала очевидной, а имеющиеся респираторы были очень неудобными и редко применялись рабочими. В 1914—1918 гг. было изготовлено очень много респираторов. Для защиты от основной опасности — газов — применялись угольные адсорбенты, некоторая защита обеспечивалась от ядовитых дымов. Например, в английских противогазах применялся слой хлопка. В период между войнами (1918—1939 гг.) были предприняты попытки применить в качестве аэрозольных фильтров различные материалы, включая целлюлозную вату и птичий пух, причем последний был более эффективным, чем вата. Было установлено, что введение в пух сажи улучшает его эффективность без значительной разницы в сопротивлении, поэтому последние модели специально подвергались «копчению» (обработке дымом). Для фильтрующих устройств бумажные фильтрующие материалы на основе эспарто или смеси эспарто с асбестом стали общепринятыми.

Фильтры на основе смеси шерсти с асбестом

В 1938 г. аэрозольные фильтры из смеси шерсти с асбестом были введены в противогазы, а позже под маркой IV были введены в качестве фильтрующей среды в противопыльные респираторы. Смесь шерсти с асбестом изготовлялась путем дробления кусочков природного голубого асбеста на тонкие волокна с последующим перемешиванием их с мериносовой шерстью и пропусканием смеси через кардную (чесальную) машину. Качество фильтра зависело в основном от эффективности дробления, смешения и расчесывания, так как в фильтрах, изготовленных из смеси грубых волокон с тонкими, филь-

трующее действие почти целиком зависит от степени расщепления асбеста на тонкие волокна и равномерности их распределения между грубыми волокнами, которые выполняют роль носителей для тонких волокон.

Фильтры на основе смеси шерсти со смолой

В 1939—1945 гг. фильтры на основе смеси шерсти с твердыми частицами смол были введены в противогазы и позже были использованы в фильтрующих установках. Смеси шерсти с частицами смол изготовлялись путем расчесывания обезжиренной шерсти с модифицированной фенолформальдегидной смолой, составляющей 20 вес. %.

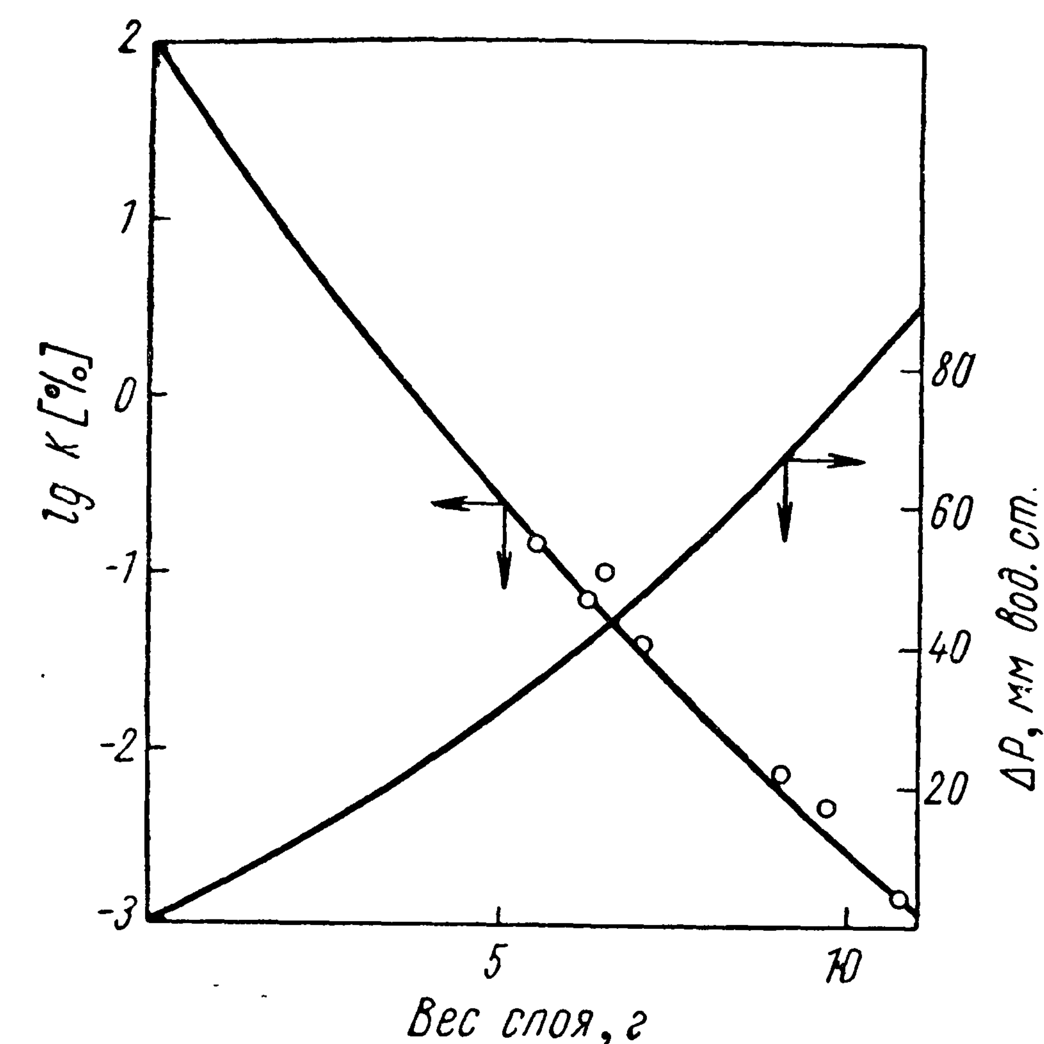


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента проскока и перепада давления от веса шерстяно-смоляного слоя (площадь поверхности 58 $см^2$; скорость 8 *см/сек*; толщина слоя 1,27 *см*).

В процессе расчесывания слоя толщиной около 150 *мм* частицы смолы приобретают отрицательный, а шерсть—положительный заряды. Для респираторов фильтры вырезаются круглыми, а оставшийся слой расчесывают снова со свежей смесью шерсти и частиц смол, так что отходы бывают очень незначительны.

В настоящее время содержание смолы снижено до 10—15%, так как начальная эффективность при этом выше, чем при 20%-ном содержании. Большим преимуществом фильтров на основе смеси шерсти и смолы являются малые величины ΔP и K, легкость размещения таких фильтрующих материалов в корпусах и малая опасность утечек по стенкам при сжатии слоя. Эластичность волокнистого слоя позволяет ему принимать любую новую форму, например при образовании вмятин на корпусе. В аналогичных случаях фильтры, снаряженные бумагой, практически становятся непригодными. В ряде образцов такие слои обычно накладываются на полые перфорированные цилиндры, а воздух пропускается от периферии к центру.

К сожалению, материал, обеспечивающий высокую начальную эффективность, подвержен неблагоприятному воздействию многих факторов. Пары и частицы органических веществ (особенно масла)

в значительных концентрациях вызывают увеличение коэффициента проскока; постепенная потеря эффективности происходит при длительном хранении; разрушение ускоряется с увеличением температуры и при высокой относительной влажности воздуха. Эффективность также падает после пропускания через фильтр больших количеств воздуха и после воздействия ионизирующего излучения; например, слой с коэффициентом проскока 0,01% после воздействия дозой 1000 *р* от промышленного рентгеновского аппарата имел $K = 0{,}05\%$. Тем не менее фильтрующие материалы на основе шерсти и смолы находят применение, например в индивидуальных рес-

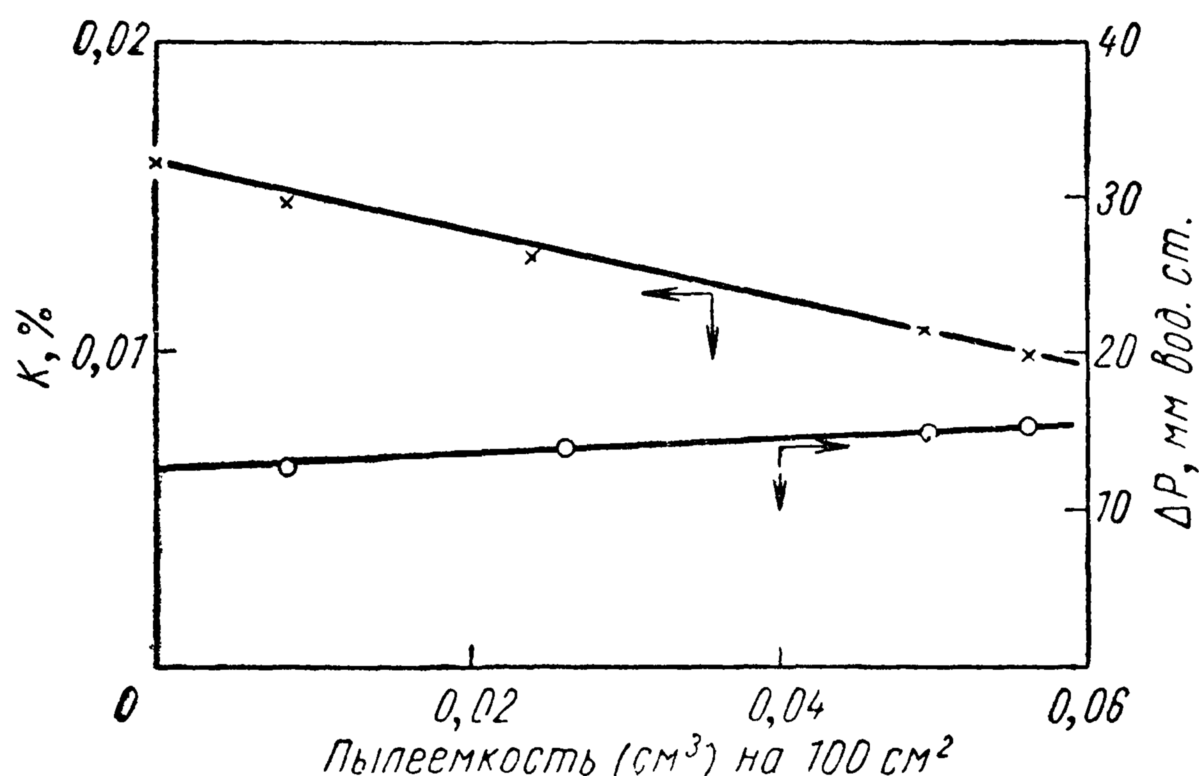


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента проскока и перепада давления от пылеемкости для шерстяно-асбестового слоя (площадь поверхности 58 *см*²; скорость 8 *см/сек*, толщина слоя 1,27 *см*, вес слоя 10 *г*).

пираторах для военных и промышленных целей, хотя в установках высокоэффективной фильтрации масштабы их применения уменьшаются.

На рис. 4.8 и 4.9 приведены характеристики шерстяно-смоляных слоев среднего качества.

Хлопко-асбестовые слои

Высокоэффективный материал, состоящий из смеси хлопка с асбестом, был описан Грином и Томасом [1]. Смесь из 50% хлопка и 50% асбеста расчесывается подобно шерстяно-смоляному материалу. Качество материала также зависит от степени расщепления асбеста на очень тонкие волокна и от равномерности их распределения. Увеличение содержания асбеста улучшает фильтрующие свойства, но при этом возрастает сопротивление, так что коэффициент фильтрующего действия Q [см. уравнение (4.4)] ухудшается; однако если содержание асбеста значительно снижается, то слой становится неоднородным. Вес слоя можно изменять, что позволяет изготовлять

материалы с различным коэффициентом проскока. В стандартном складчатом фильтре слой весит 484 *г/м*², при скорости 1,25 *см/сек* сопротивление достигает 25,4 *мм вод. ст.*, а коэффициент проскока — 0,001%.

При значительном снижении веса слоя получаются фильтры с низким сопротивлением, но коэффициент проскока увеличивается.

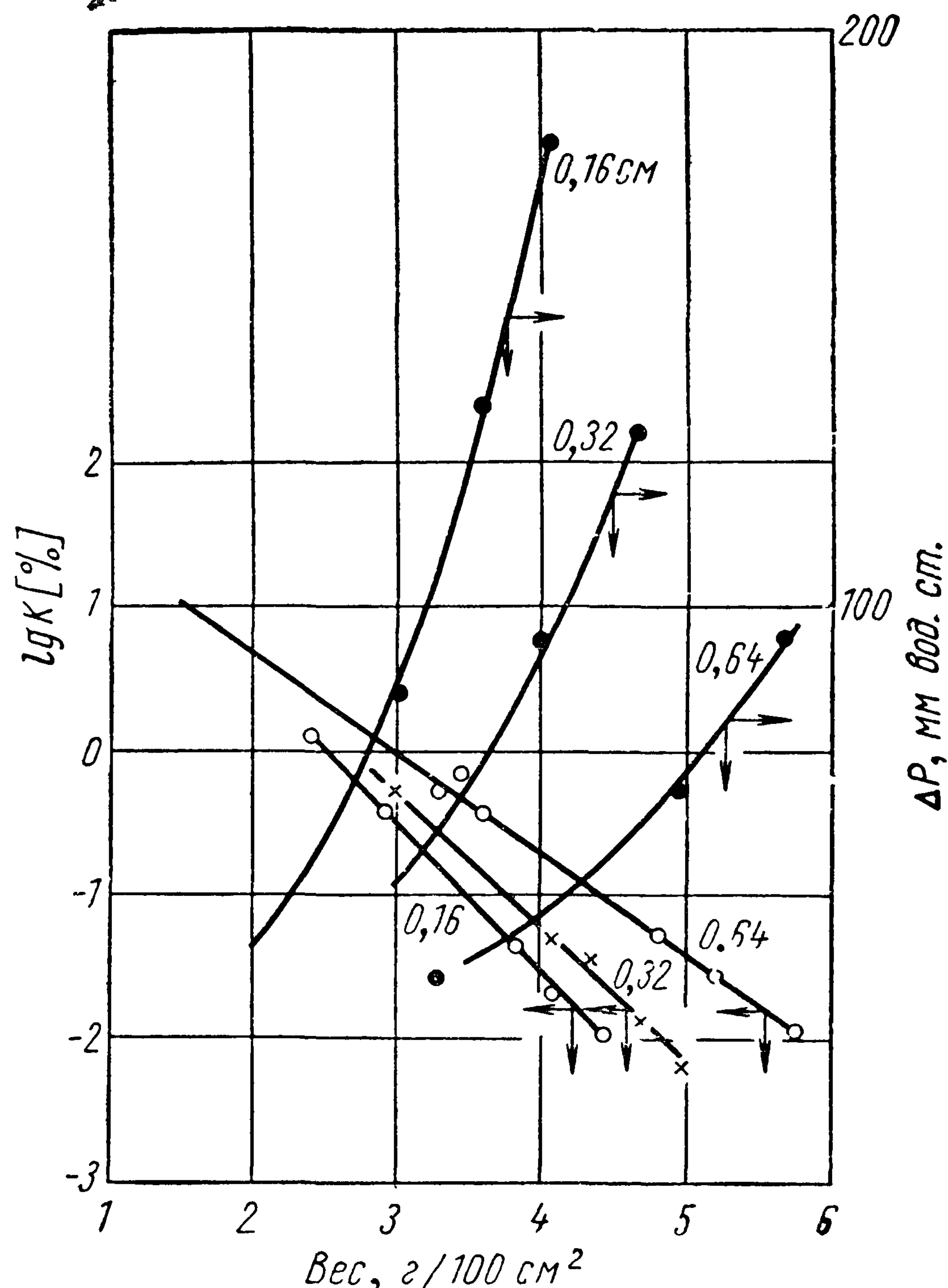


Рис. 4.10. Характеристики хлопко-асбестового слоя (скорость фильтрации 10 *см/сек*. Цифры на кривых — толщина слоя).

Если применять слои с большим весом, чем при стандартном снаряжении, то увеличение толщины материала и снижение площади поверхности вызывают недопустимо высокое сопротивление. Использование хлопка в смеси ограничивает применение материала при высоких температурах, а также в тех случаях, когда есть возможность появления искр. И хотя пропускание воздуха с температурой 150° С в течение нескольких дней не вызывает снижения эффективности, применять более высокие температуры не рекомендуется.

На рис. 4.10—4.12 приведены рабочие характеристики фильтра с хлопко-асбестовым материалом. На рис. 4.13 дана микрофотография хлопко-асбестового материала, из которой видно, что много асбестовых волокон еще осталось в пучках (хотя предполагалось,

что асбест хорошо диспергирован). К сожалению, более полное использование тонких волокон (0,1 *мкм* и меньше) не может быть достигнуто вследствие последующего группирования волокон в пуч-

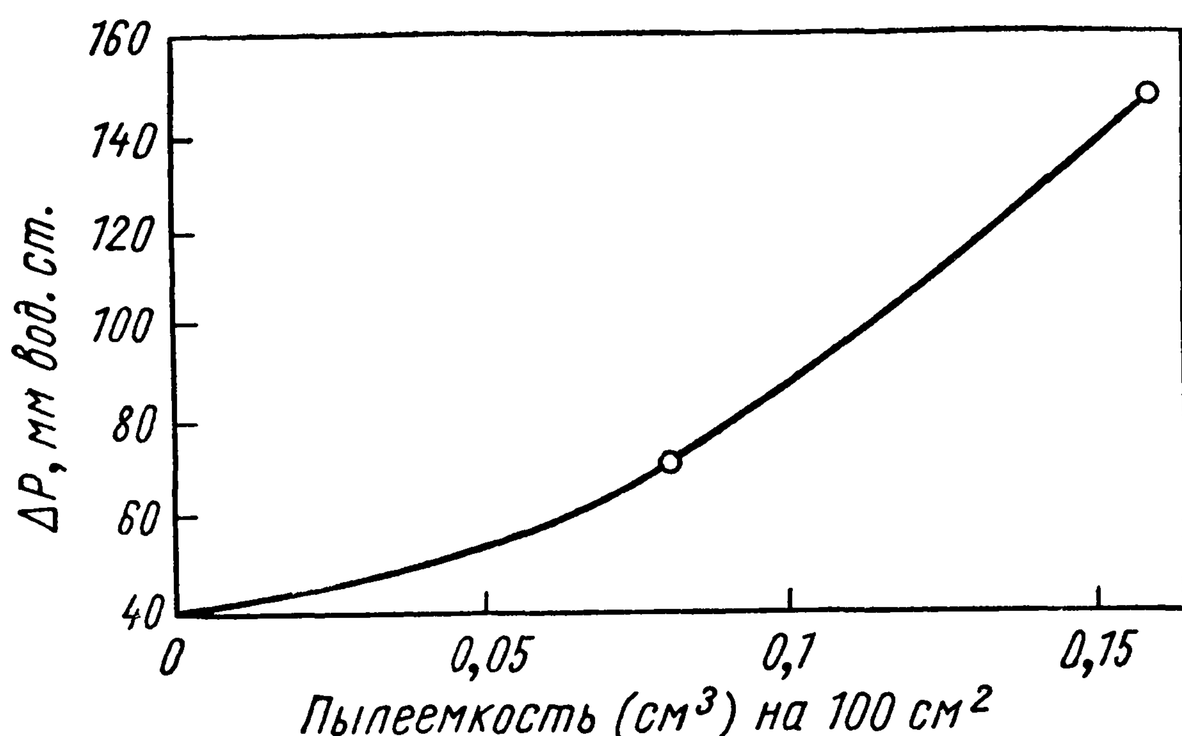


Рис. 4.11. Зависимость перепада давления хлопко-асбестового слоя от пылеемкости (скорость фильтрации 2,54 *см/сек*; толщина слоя 0,48 *см*, вес слоя 5,4 *г*/100 *см*^{2}).

ки. Недостаточная степень расщепления частично является следствием большого различия в размерах хлопковых и асбестовых во-

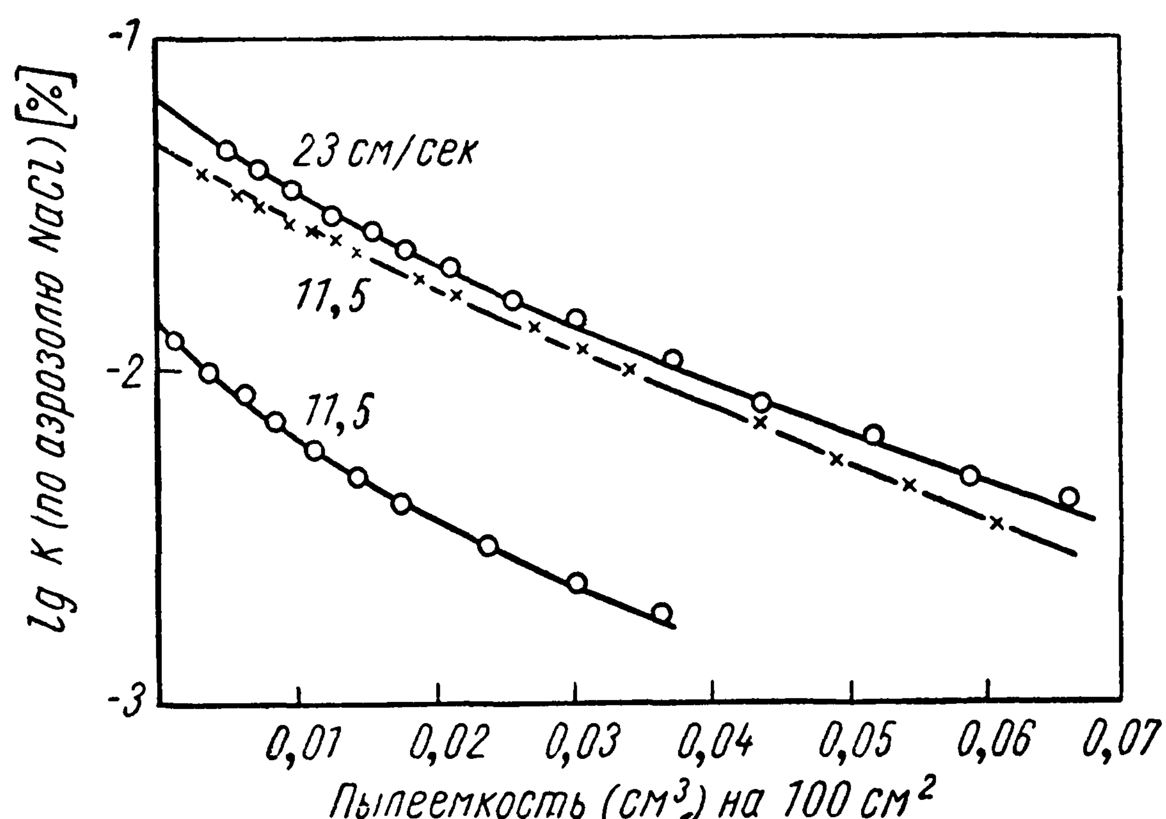


Рис. 4.12. Зависимость коэффициента проскока от пылеемкости хлопко-асбестового слоя (толщина слоя 0,64 *см*; вес для двух верхних кривых 6,6 *г*/100 *см*^{2}, для нижней кривой — 8,6 *г*/100 *см*^{2}. Цифры на кривых — скорость фильтрации).

локон. Иными словами, при равных условиях, чем ближе размеры волокон между собой, тем меньше вероятность сбивания их в пучки. Особенно тонкие асбестовые волокна показаны на рис. 4.14.

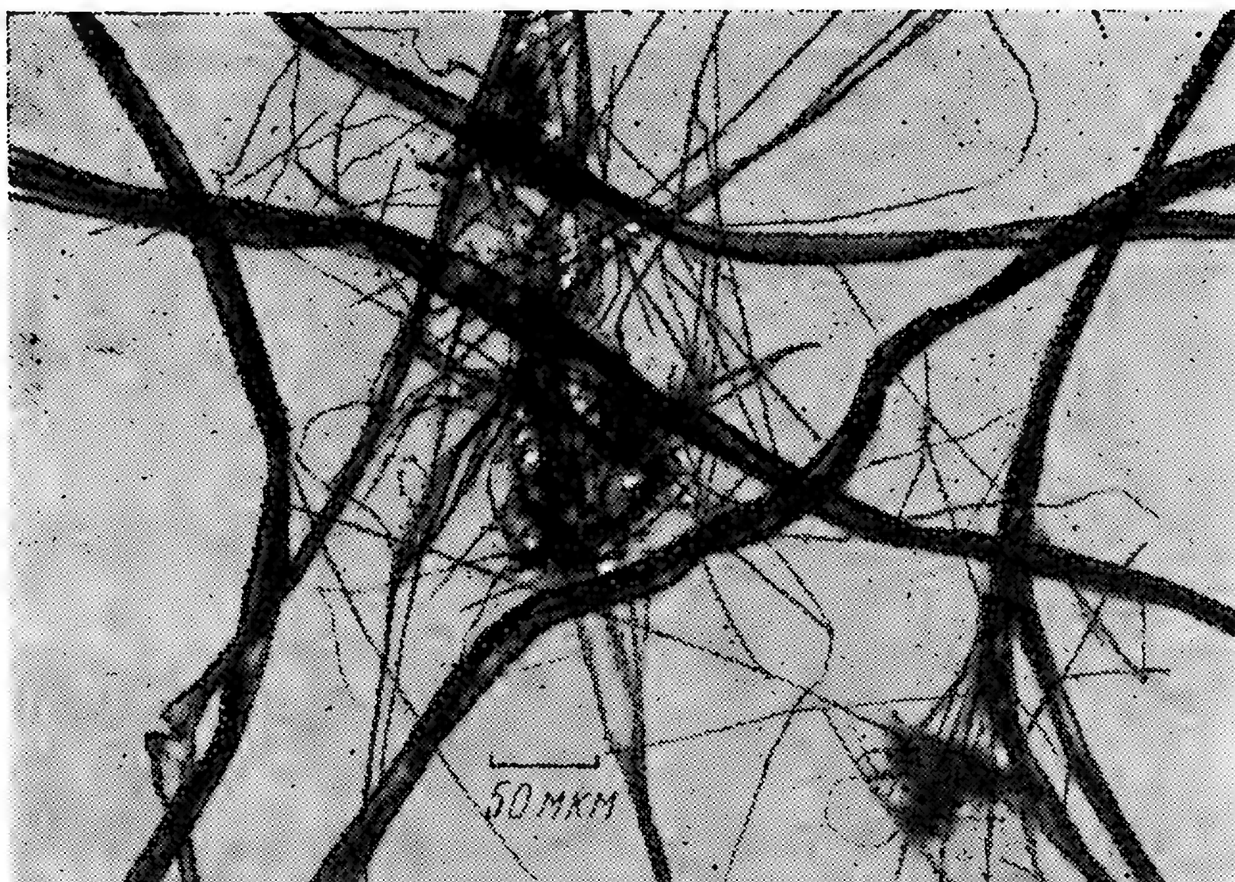


Рис. 4.13. Хлопко-асбестовый слой (оптический микроскоп).

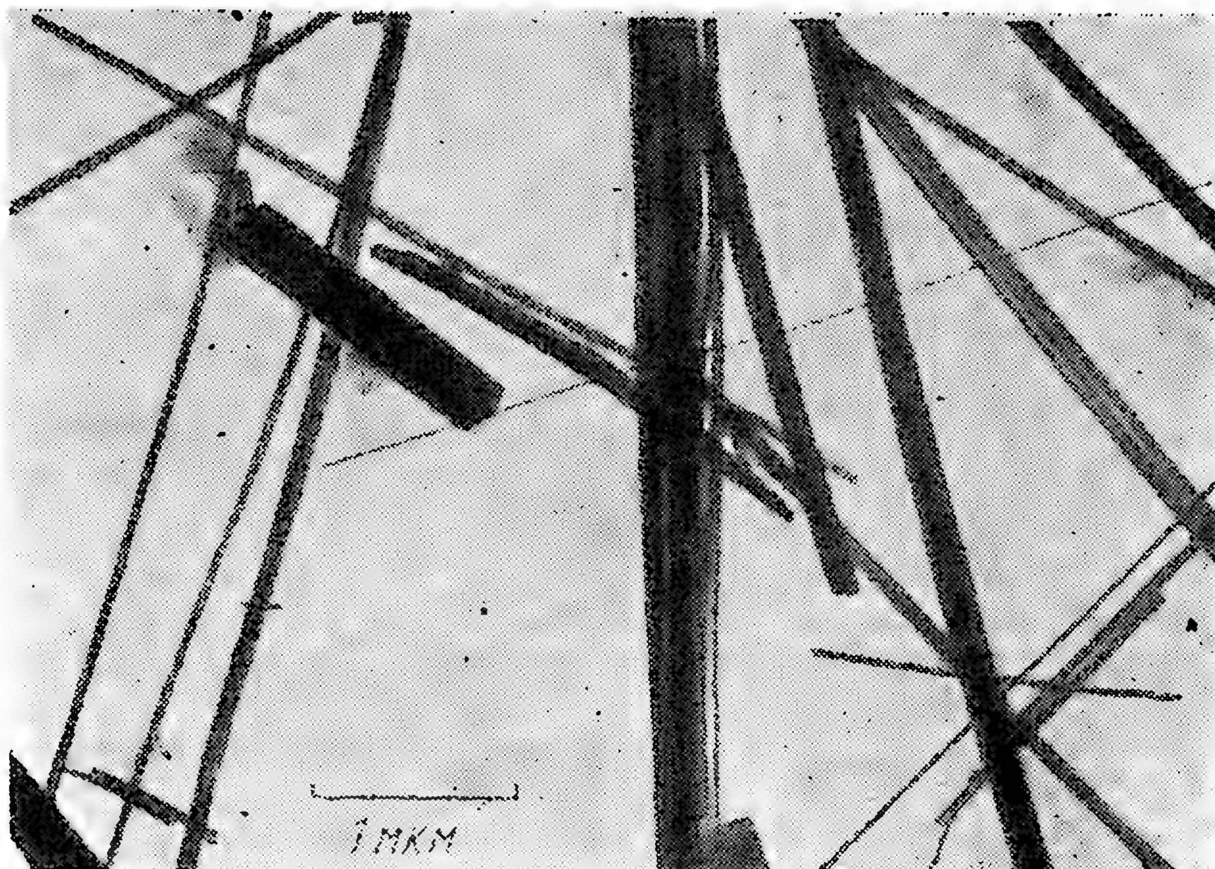


Рис. 4.14. Волокна голубого асбеста (электронный микроскоп).

Бумаги целлюлозно-асбестовой композиции

Состав этих бумаг меняется в производстве, но в основном они содержат 50% волокна эспарто, 20% голубого асбеста, 25% хлопка и немного пеньки. Для получения бумаги высокого качества необходимо хорошо распределять тонкорасщепленные асбестовые волокна во всем материале. Наиболее высококачественные сорта требуют большого внимания в производстве.

Основные фильтрующие характеристики таких бумаг следующие.

1. *Коэффициент проскока и сопротивление.* При скорости 4 *см/сек* ΔP = 33 *мм вод. ст.* Коэффициент проскока по аэрозолю хлористого натрия —0,01% для материала немного выше среднего количества.

2. *Термостойкость.* Материал непригоден к длительной непрерывной работе при температуре свыше 120° С. При 170° С срок службы 1 *ч.* Целлюлоза горюча и, кроме потери эффективности фильтрации, фильтр может загореться.

3. *Влагостойкость.* Устойчивость к увлажнению только удовлетворительная.

4. *Толщина.* Результаты, проведенные в пункте 1, получены на бумаге толщиной 1,5 *мм*, при весе 200 *г/м*^{2}.

5. *Гофрирование.* Материал достаточно легко складывается, но надо следить за тем, чтобы не происходило ломки при сгибании.

Характеристики фильтрующего картона среднего качества приведены на рис. 4.15 и 4.16.

Стеклянное волокно *

Стеклянное волокно получается при плавлении стеклянных шариков в электрической печи: расплавленное стекло вытекает через тонкие отверстия в основании плавильной камеры и растягивается в волокна высокоскоростным потоком воздуха. Волокна попадают на ленточный конвейер и формируются в слои любой желаемой толщины. При необходимости на волокна сразу же напыляются связующие смолы. Технологический процесс может изменяться, обеспечивая изготовление грубых или тонких волокон, но все слои, полученные этим способом, содержат волокна в относительно широком диапазоне размеров: в фильтрующем материале типа 2 имеются волокна менее 1 *мкм* и более 10 *мкм*; волокон диаметром менее 3,5 *мкм* содержится до 50% (в расчете на общую длину волокон), в то время как слои из более тонких волокон (фильтрующий материал типа 3) содержат около 95% волокон диаметром менее 3 *мкм* и 50% — менее 1 *мкм*. Эти цифры сугубо ориентировочные. Качество материалов различных партий, поставляемых неко-

* Во избежание применения торговых обозначений, которые у разных изготовителей различны, фильтрующие материалы разделены в этой главе по величине диаметра волокон и для облегчения разбиты на 3 типа.

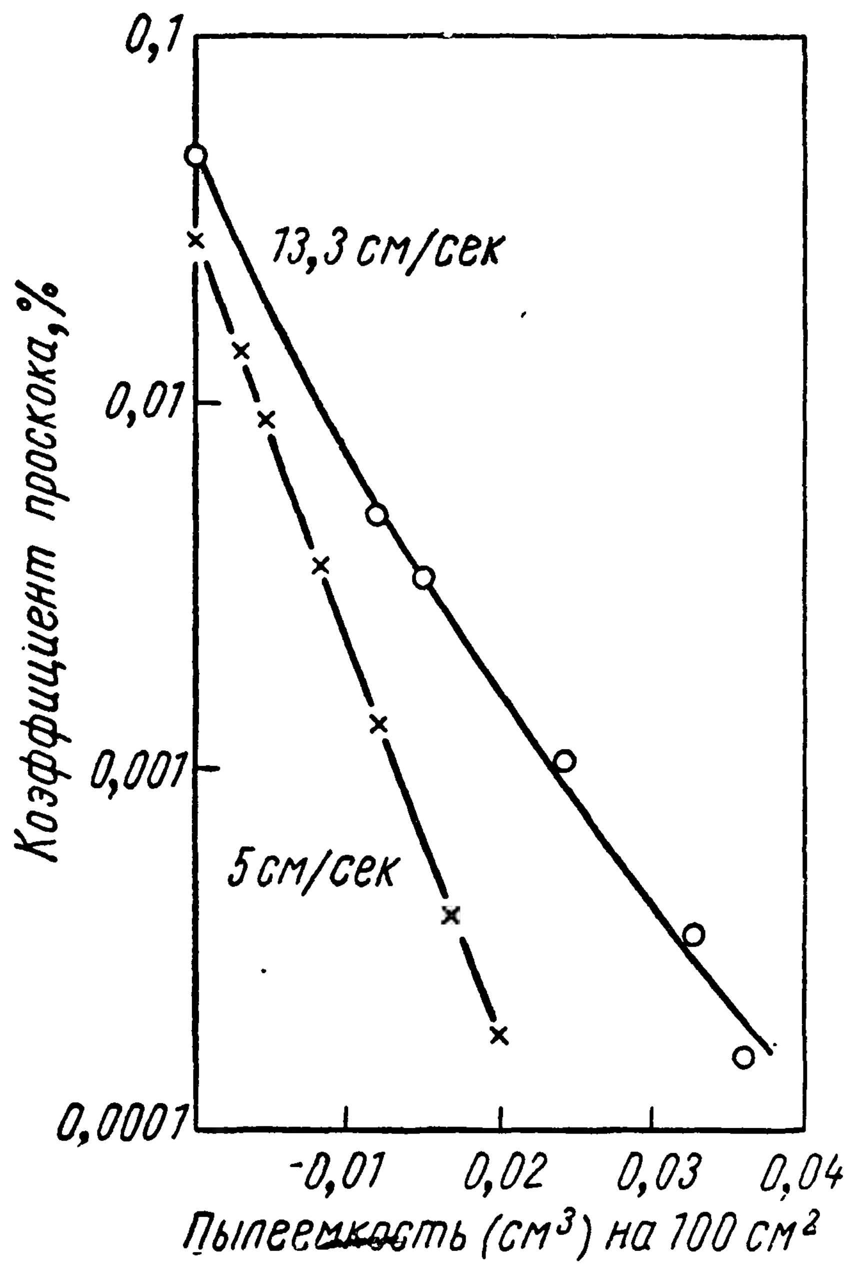


Рис. 4.15. Зависимость коэффициента проскока от пылеемкости целлюлозно-асбестовой бумаги (цифры на кривых — скорость фильтрации).

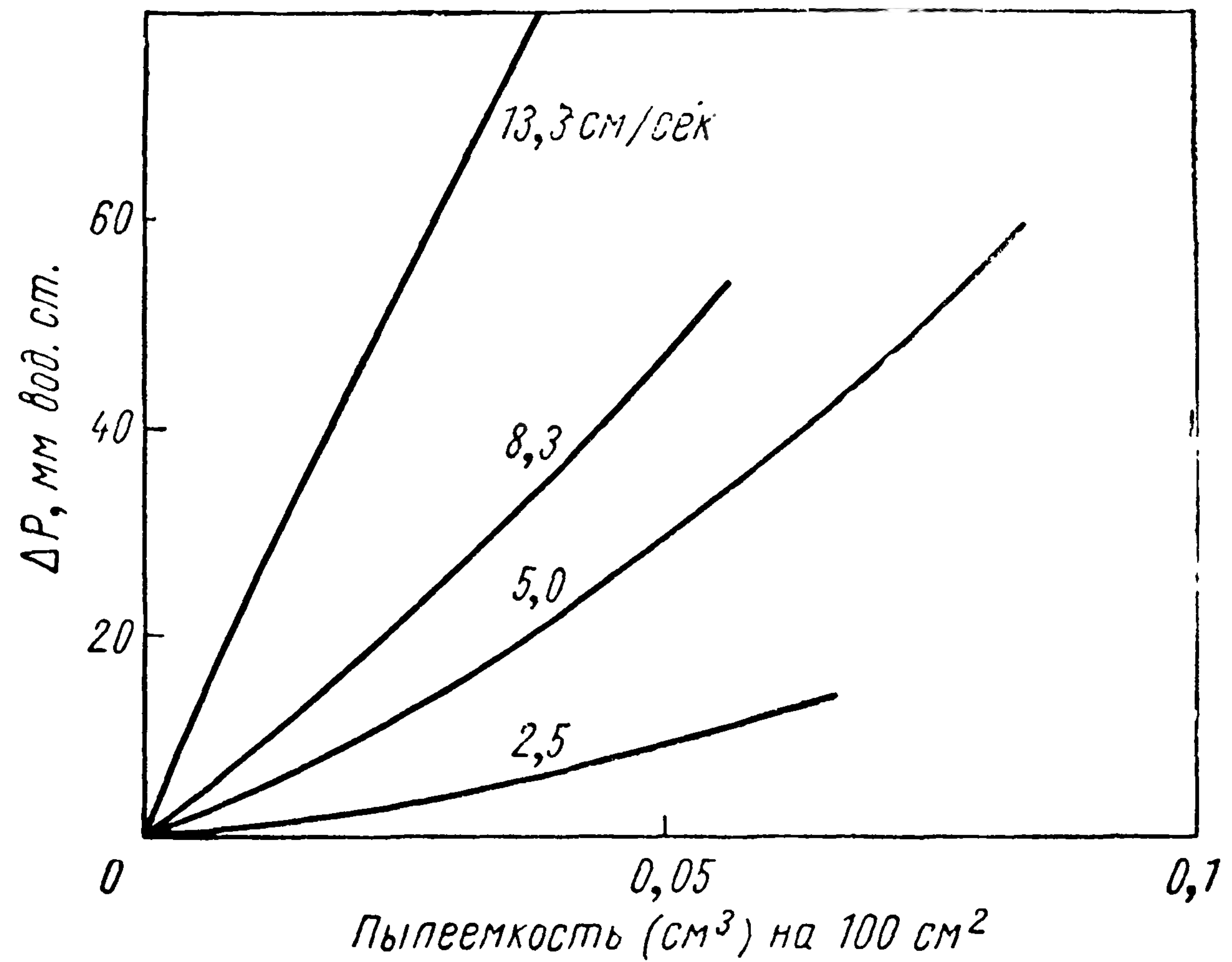


Рис. 4.16. Зависимость перепада давления от пылеемкости для целлюлозно-асбестовой бумаги (цифры на кривых — скорость фильтрации; при 5,0 *см/сек* начальное сопротивление равно 35 *мм вод. ст.*).

торыми фирмами под одним и тем же обозначением, часто существенно отличается.

На рис. 4.17 показаны характеристики слоев с различным весом единицы площади при их уплотнении до 3,2 *мм* (испытаны при скорости 10 *см/сек*). Кривые относятся к материалам типов 2 и 3, а также к более грубым материалам, содержащим волокна с максимальным диаметром 14 *мкм* и 50% волокон диаметром менее 6 *мкм* (тип 1).

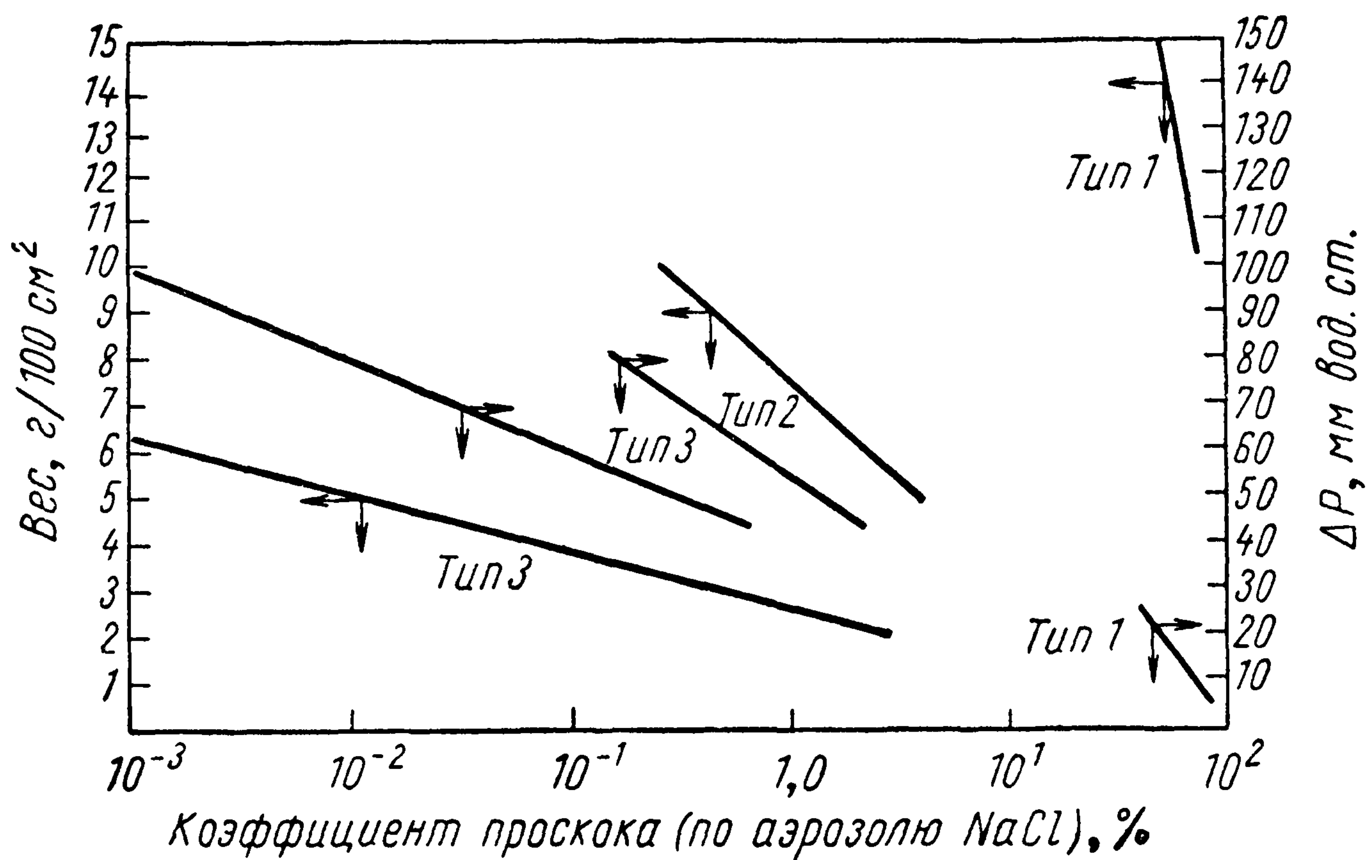


Рис. 4.17. Зависимость коэффициента проскока от веса и сопротивления для стекловолокнистых материалов.

Волокна, относящиеся к фильтрующим материалам типа 3, обеспечивают высокую эффективность. Особенно они пригодны для небольших фильтров, когда материалы находятся в корпусе в виде плоских, слегка поджатых слоев или когда применяются три или четыре слоя (например, при обертывании цилиндрического сетчатого каркаса) (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Характеристики волокнистых материалов типа 3 в форме плоских листов (ΔP и K измерены при скорости 10 *см/сек*)

Вес, *г/м²*	Глубина слоя, *мм*					
	1,6		3,2		6,4	
	Δ*P*, *мм вод. ст.*	*K*, %	Δ*P*, *мм вод. ст.*	*K*, %	Δ*P*, *мм вод. ст.*	*K*, %
200	48	0,2	36	0,3	28	0,4
250	62	0,07	44	0,1	35	0,15
300	79	0,015	53	0,035	43	0,045
350	100	0,002	62	0,01	50	0,015

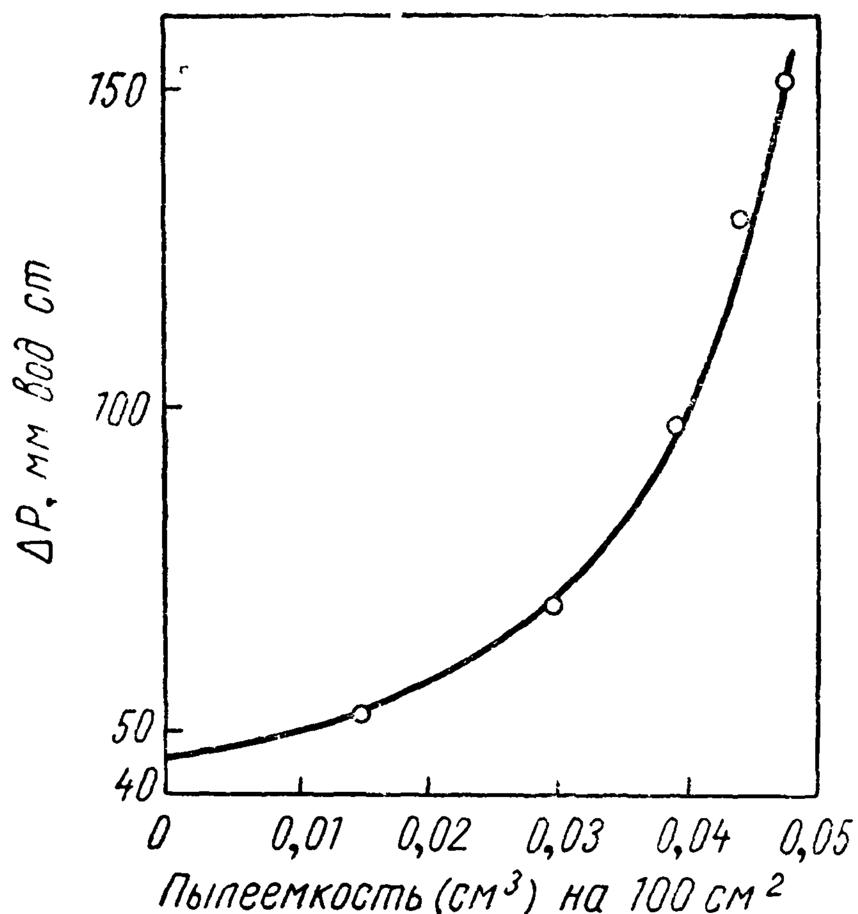


Рис. 4.18. Зависимость перепада давления от пылеемкости для стекловолокнистой бумаги типа 3 (скорость 11,5 *см/сек*, вес 2,6 *г*/44 *см*², толщина 0,64 *см*, $K_{нач} = 0{,}01\%$; $K_{кон} = 0{,}0001\%$ по аэрозолю NaCl).

Четыре слоя волокон типа 3, навернутые плотно на каркас, показали следующие данные: вес 1 *м*² — 320 *г*, $\Delta P = 15$ *мм вод. ст.* и $K = 0{,}0001\%$ при $v = 15$ *см/сек* (рис. 4.18, 4.19).

Волокнистый материал типа 3 использовался для очистки от бактерий или вирусов при низкой скорости потока. Из этого материала можно изготовлять фильтры в условиях лаборатории. Стерилизация таких фильтров паром лишь незначительно влияет на эффективность. Этот материал мягкий, поэтому с ним легко обращаться, но в него входят и достаточно грубые волокна, что обеспечивает его прочность и упругость. После складывания он может уплотняться в корпусе аналогично асбесто-хлопковому слою.

Многие типы стекловолокон, значительно более тонких, чем в материале типа 3, изготовляются путем раздувания струей воздуха нитей расплавленного стекла. Иногда рекламируют получение этим методом смесей волокон с максимальным диаметром 0,1 *мкм*, но

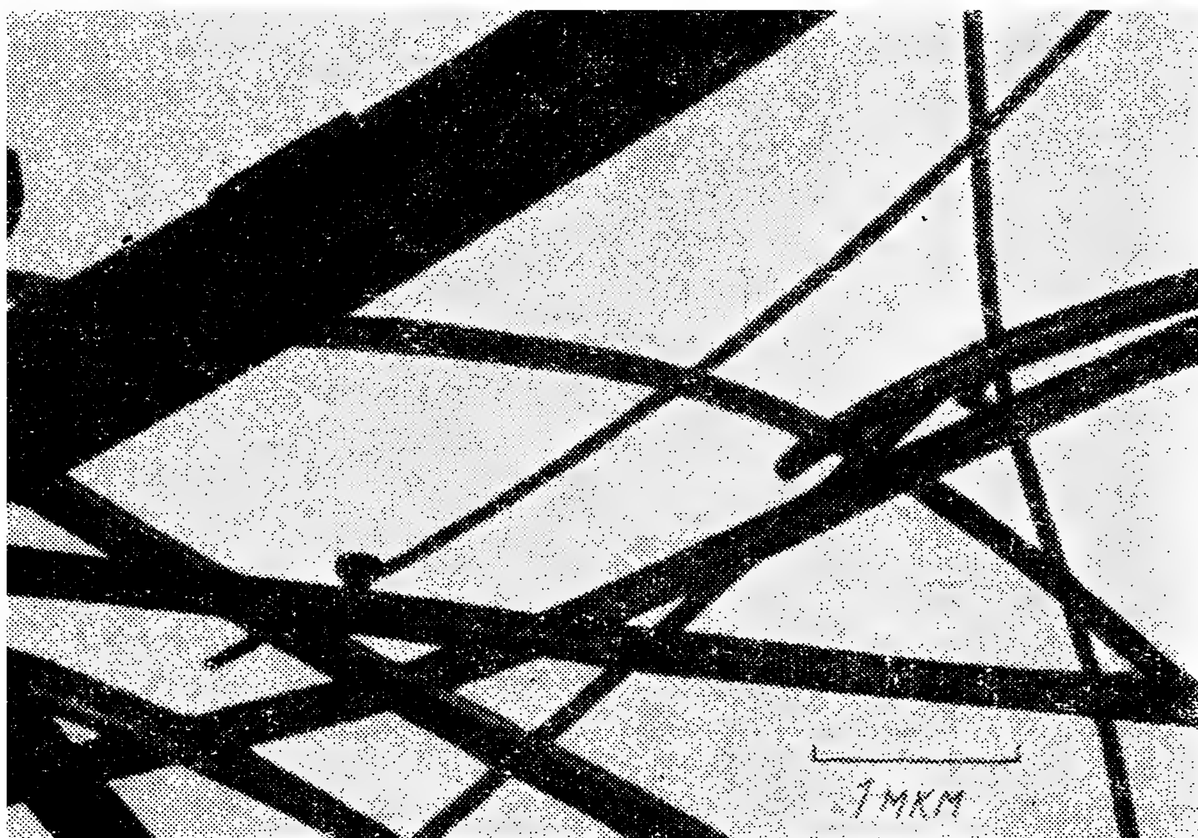


Рис. 4.19. Стеклянные волокна типа 3 (электронный микроскоп).

более тонкие сорта имеют малую упругость и используются в основном для изготовления бумаги.

Волокна производятся также методом вытягивания, по технологии, аналогичной производству синтетических текстильных волокон. Степень полидисперсности волокон при этом меньше, чем при раздувании, но даже наиболее тонкие волокна сравнительно грубы, их диаметр около 3 *мкм*.

Бумага из стекловолокна

С получением субмикронных стеклянных волокон появилась возможность изготовлять бумаги, которые могут конкурировать с целлюлозно-асбестовыми по своим фильтрующим качествам. В последние годы много усилий было затрачено на получение таких материалов. Производство бумаги из стекловолокна, как и бумаги, содержащей асбест, — довольно сложный процесс.

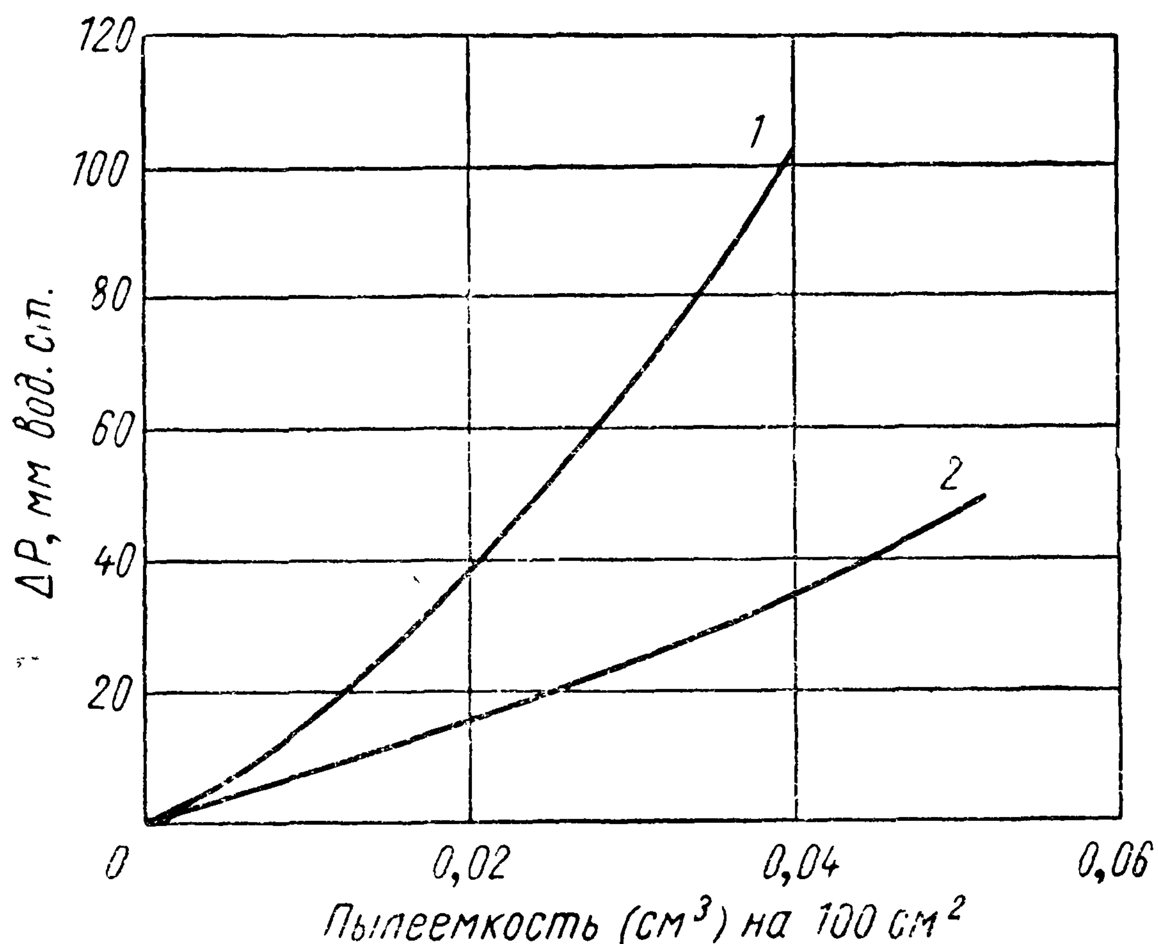


Рис. 4.20. Зависимость перепада давления от пылеемкости для стекловолокнистой бумаги:

1 — скорость фильтрации 13,3 *см/сек*, начальное сопротивление 61 *мм вод. ст.*; *2* — скорость фильтрации 5 *см/сек*, начальное сопротивление 23 *мм вод. ст*

Стеклянные волокна не подвергаются фибриллированию, они хрупки, ломаются при обычных бумагоделательных операциях. Длительность операции размола снижена настолько, что она достаточна только для выделения волокон при низком *pH* (≈3). Это способствует разделению волокон и улучшает прочность за счет связывания их между собой. Для увеличения прочности добавляют небольшое количество связующего, но в основном прочность бумаг обязана переплетению волокон и трению между ними.

Важнейшие свойства бумаги из стекловолокна следующие:

1. *Коэффициент проскока и сопротивление.* Бумаги из стекловолокна имеют высокий коэффициент фильтрующего действия Q (рис. 4.20, 4.21).

2. *Термостойкость.* Они могут применяться при температуре до 500° С и негорючи, хотя искры могут расплавить волокна и привести к серьезной потере эффективности фильтрации; сами по себе фильтры неогнеопасны.

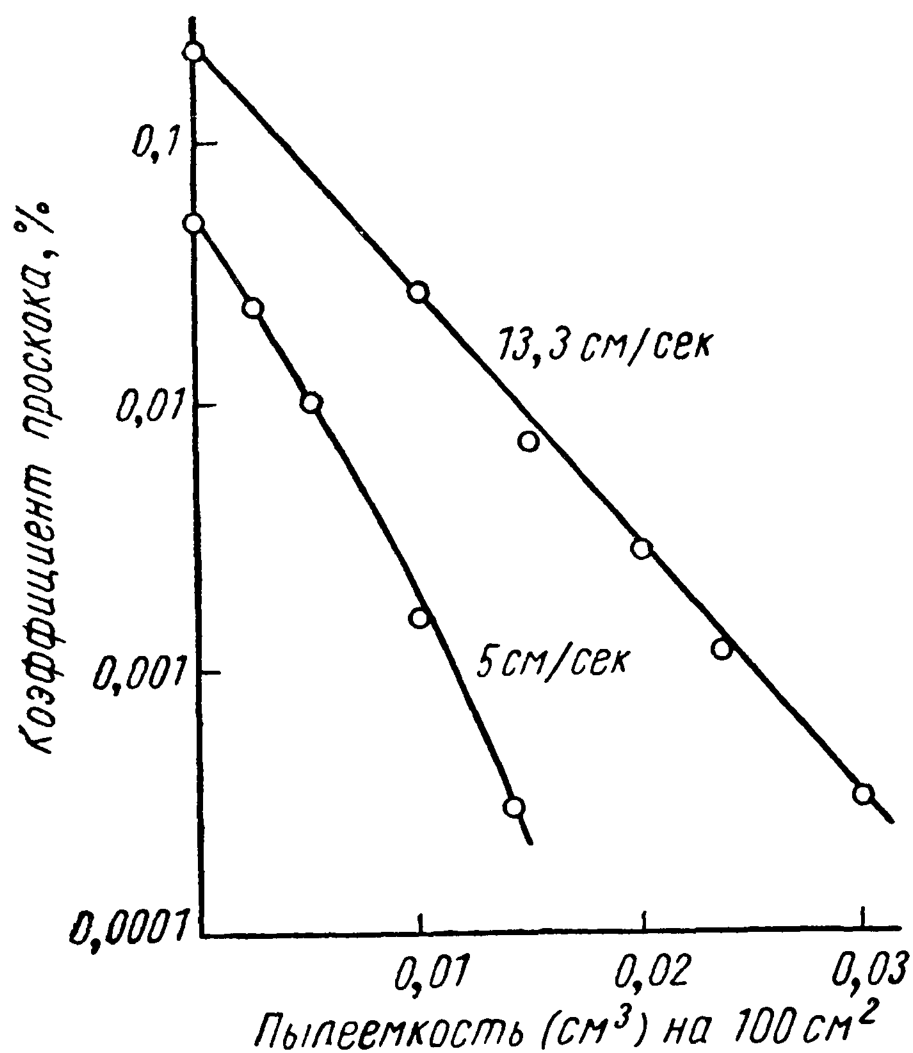


Рис. 4.21. Зависимость коэффициента проскока от пылеемкости для стекловолокнистой бумаги (цифры на кривых — скорость фильтрации).

3. *Влагостойкость.* Бумаги из стекловолокна сохраняют свою эффективность даже в условиях высокой влажности.

4. *Химическая устойчивость.* Они имеют хорошую устойчивость к воздействию большинства химических веществ, а также к микробиологическим и инсектицидным воздействиям.

5. *Толщина.* В корпусе определенного размера могут быть размещены значительно большие площади фильтрующей поверхности, чем в случае применения материалов более рыхлого строения.

6. *Гофрирование.* Складки из такой бумаги должны выполняться осторожно для предотвращения ее ломки в местах перегиба, что часто служит источником увеличения коэффициента проскока аэрозолей.

В США и в Англии изготовляются бумаги на основе смеси стеклянных и асбестовых волокон, но они не обладают преимуществами по сравнению со стеклянной бумагой.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРУГИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ФИЛЬТРОВ

Новые материалы, кроме обеспечения соответствующих фильтрующих характеристик, должны конкурировать в стоимости с хорошо разработанными фильтрующими материалами. Однако к фильтрам иногда предъявляются специальные требования, такие, как высокотемпературная фильтрация. В этом случае стоимость материалов отходит на второй план. Этот раздел посвящен материалам специального назначения, изготовляемым из волокон, которые уже

применяются в фильтрах, но требуют еще дальнейшего совершенствования для более широкого применения, а также из материалов, которые производятся в виде волокон, но фильтрующие материалы на их основе еще не созданы.

Термопластичные волокна

Тонкие волокна из термопластичных полимеров получают экструзией горячего расплавленного термопластика с последующим распылением нитей высокоскоростным потоком горячего воздуха [2, 3]. Уинт дал описание процесса, который по существу является поршневой экструзией, усиленной воздействием двух потоков горячего воздуха непосредственно на расплавленные волокна. Итес применил сеточный экструзер, производящий непрерывное волокно. На рис. 4.22 показан аппарат Итеса, в котором цилиндр снабжен электронагревателем, а шнек выдвинут для обеспечения охлаждения водой. Расплав вытекает струйками диаметром 0,7 *мм*, которые распыляются горячим воздухом. Волокна собираются на перемещающуюся сетку в виде слоя, который можно связать нагревом или сжатием в полотно, аналогичное войлоку. Диаметр волокон определяется температурой и скоростью подачи сырья и воздуха.

Полиэтиленовое волокно формируется этим методом легко, но из него нельзя приготовить слои со значительным содержанием субмикронных волокон; получающиеся материалы можно успешно использовать только там, где не требуется высокоэффективная фильтрация. Однако особенностью таких материалов является прекрасная стойкость к химическим воздействиям. Нейлон, требующий тщательного контроля за температурой, образует более тонкие волокна, которые содержат значительную долю субмикронных волокон; из них легко получаются листы, которые по эффективности сравнимы с асбестовой бумагой. Полистироловые материалы используются в качестве пробоотборных фильтров. Они содержат очень мало нерастворимых веществ и легко растворяются в органических жидкостях. Некоторые термопластические волокна могут входить в композиции со стеклянным волокном, но такие фильтры, по-видимому, не найдут широкого применения.

При экструзии волокна заряжаются за счет трибоэффекта, но эти заряды, по-видимому, не могут иметь большого значения при фильтрации с обычными скоростями воздуха. Все материалы из термопластических волокон содержат сферические включения — наиболее вероятные места повышенных проскоков, особенно в тех случаях, когда из слоев формируются листы.

В табл. 4.2 сравниваются типичные показатели слоев из термопластических волокон и из некоторых других волокнистых материалов.

Несколько испытаний было проведено с небольшими образцами слоев из поливинилхлоридного волокна. Этот материал состоит из подпрессованных в холодном состоянии волокон диаметром 1 *мкм*.

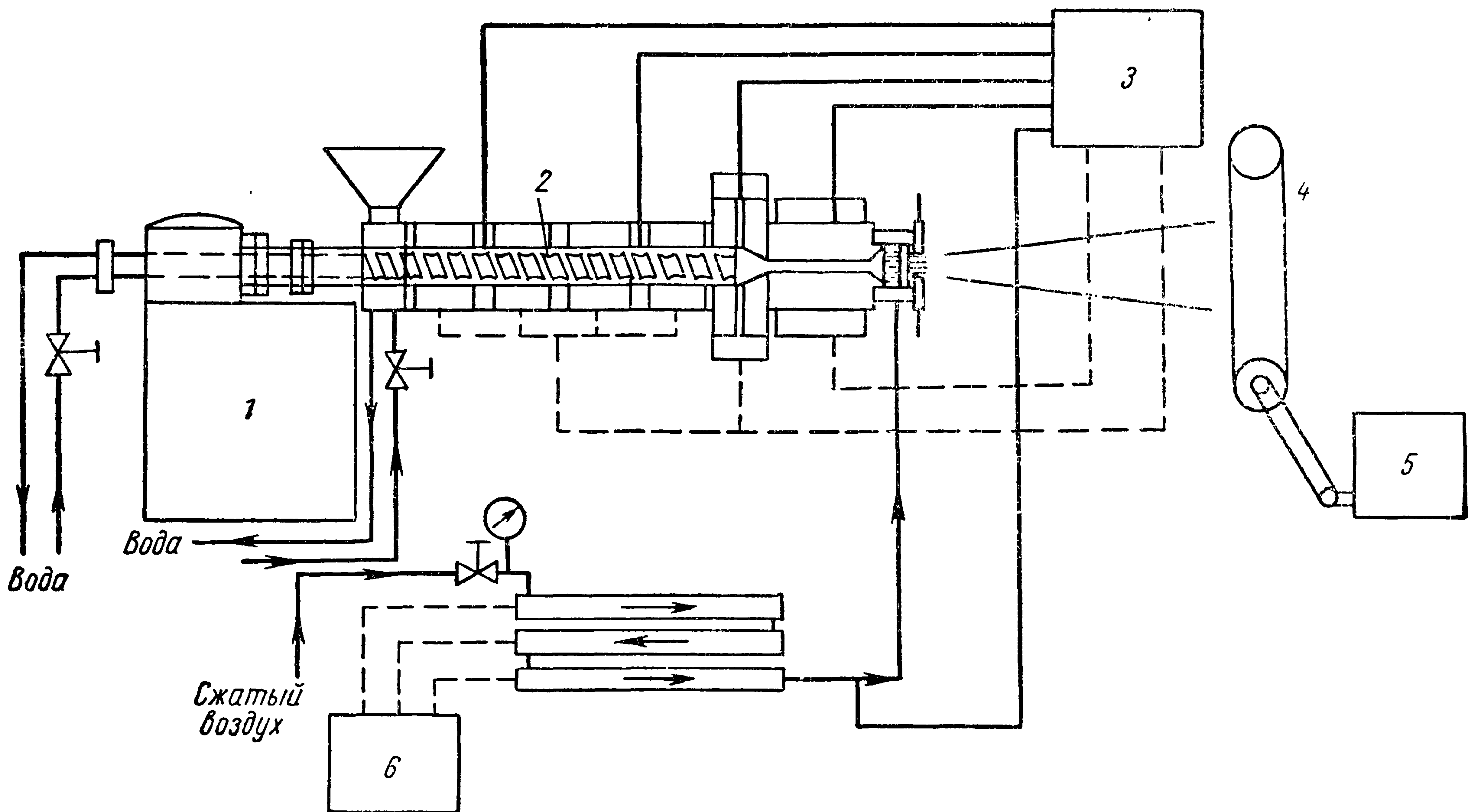


Рис. 4.22. Схема аппарата для получения волокон экструзией:

1 — привод; *2* — шнек; *3* — приборы контроля и управления температурой; *4* — собирающая сетка; *5* — двигатель с регулируемой скоростью; *6* — приборы управления нагревом.

Таблица 4.2

Сопротивление, коэффициент проскока и вес термопластических и некоторых других фильтрующих материалов.

Скорость воздуха — 11,4 *см/сек*, при определении Δ $Pv = 32,2$ *см/сек* (площадь образцов 100 *см*^{2})

Материал	Коэффициент проскока по метиленовой голубой, %						Диаметр волокон, *мкм*
	1		0,1		0,01		
	ΔP, *мм вод. ст.*	вес, *г*	ΔP, *мм вод. ст.*	вес, *г*	ΔP, *мм вод. ст.*	вес, *г*	
Полиэтилен . . .	313	5,1	610	6,9	—	—	2,0—12,0 (50% волокон>3,0)
Полистирол . . .	165	1,45	263	2,0	3,71	2,45	0,5—6,5 (50% волокон>1,5)
Капрон	122	1,6	183	2,0	246	2,35	0,7—2,5 (50% волокон>1,6)
Полипропилен . .	101	1,3	203	1,85	305	2,25	0,7—6,0 (50% волокон>0,8)
Стекловолокно, тип 3	109	1,45	164	2,15	221	2,85	0,6—6,8 (50% волокон>1,0)
Хлопок-асбест . .	122	1,15	208	1,45	305	1,75	
Шерсть со смолой	38	3,2	89	5,0	140	6,6	

Волокна несут большие заряды, и это должно обеспечить высокую эффективность фильтрации; вероятно, как и в случае шерстяно-смоляных материалов, заряды со временем стекают. Эффективность, определенная по солевым аэрозолям, сравнима с эффективностью асбестосодержащих бумаг, имеющих в два раза большее сопротивление, но скорость их забивания такая же, как и у асбестовых бумаг.

Шлаковая шерсть

Шлаковая шерсть изготовляется из доменного шлака путем распыления расплавленного материала быстро вращающимся диском или высокоскоростными струями горячего воздуха. Образуются волокна диаметром около 5 *мкм* с небольшим содержанием волокон размером 1 *мкм* и «дроби». Главными компонентами являются SiO_2, Al_2O_3 и CaO; содержание окислов железа может достигать 30%, но это серьезно не влияет на получение волокна. Шлаковая шерсть используется для фильтрации горячих агрессивных газов (не было обнаружено никаких разрушений после эксплуатации ее при температурах около 600° С). Выпускается она в виде слоев и пластин различной формы весом 83—88 *кг/м*^{2}. Сильверман [4] описал аппарат, в котором слои шлаковой шерсти используются для фильтрации возгонов окиси железа (большинство частиц размером 0,2 *мкм*)

из конверторных газов при $t = 500°$ С и скорости 0,5 *м/сек*. Была достигнута эффективность очистки около 90% при сопротивлении 150 *мм вод. ст.* (табл. 4.3).

Таблица 4.3

Характеристики образцов материала на основе шлаковой шерсти при различных плотностях упаковки

Вес, *г/см²*	Толщина, *см*	Сопротивление, *мм вод. ст.*	Скорость воздуха, *см/сек*	Коэффициент проскока по аэрозолю NaCl, %
0,8	2,54	—	3,6	0,2
0,8	2,54	—	5,5	0,5
0,8	2,54	—	7,5	0,75
0,8	2,54	132	11,0	1,4
1,31	1,27	48	11,0	21,6
0,48	1,27	102	11,0	6,0
0,63	2,54	94	11,0	4,0
0,16	2,54	41	130,0	60,0

Пористая керамика

Керамические фильтры редко применяются в системах очистки воздуха, так как их сопротивление слишком велико; они используются главным образом для фильтрования жидкостей, а также в таких процессах, как осаждение из газов сернокислотного тумана, как фильтрация CO_2 в системах охлаждения или в качестве всасывающих труб.

Керамические фильтры широко применяются для фильтрации сжатого газа, когда фильтры должны противостоять высокому перепаду давления, а также при температурах около 500° С и выше или при температурах ниже нуля; некоторые типы таких фильтров имеют высокое сопротивление к термоударам.

Обычно керамические фильтры состоят из частиц стекловидного глинозема, причем эффективность фильтрации и сопротивление зависят от размеров пор, величина которых контролируется. Конструктивно они очень прочны и устойчивы к воздействиям большинства химических агентов, кроме горячих щелочей, фосфорной и плавиковых кислот. Фильтры могут изготовляться в форме плоской черепицы, однако более распространенной формой являются полые трубы с обоими открытыми концами или с одним закрытым концом; загрязненный воздух пропускается с внешней стороны стенки трубы к внутренней. Трубы очищают промывкой или продувкой под большим давлением с внутренней стороны, что вызывает ломку накопившегося осадка с внешней стороны элемента. В случае липких материалов, например воска, очистка которых обратным потоком воздуха невозможна, должны применяться другие способы, например очистка паром. При этом одновременно осуществляется стерилизация.

На практике большое внимание уделяется креплению труб или свечей с рамкой фильтра (штоком с нагруженной пружиной), так как часто наблюдаются утечки вследствие неодинакового расширения рамы и керамики. Результаты испытаний различных сортов керамики по полидисперсным аэрозолям со средним размером час-

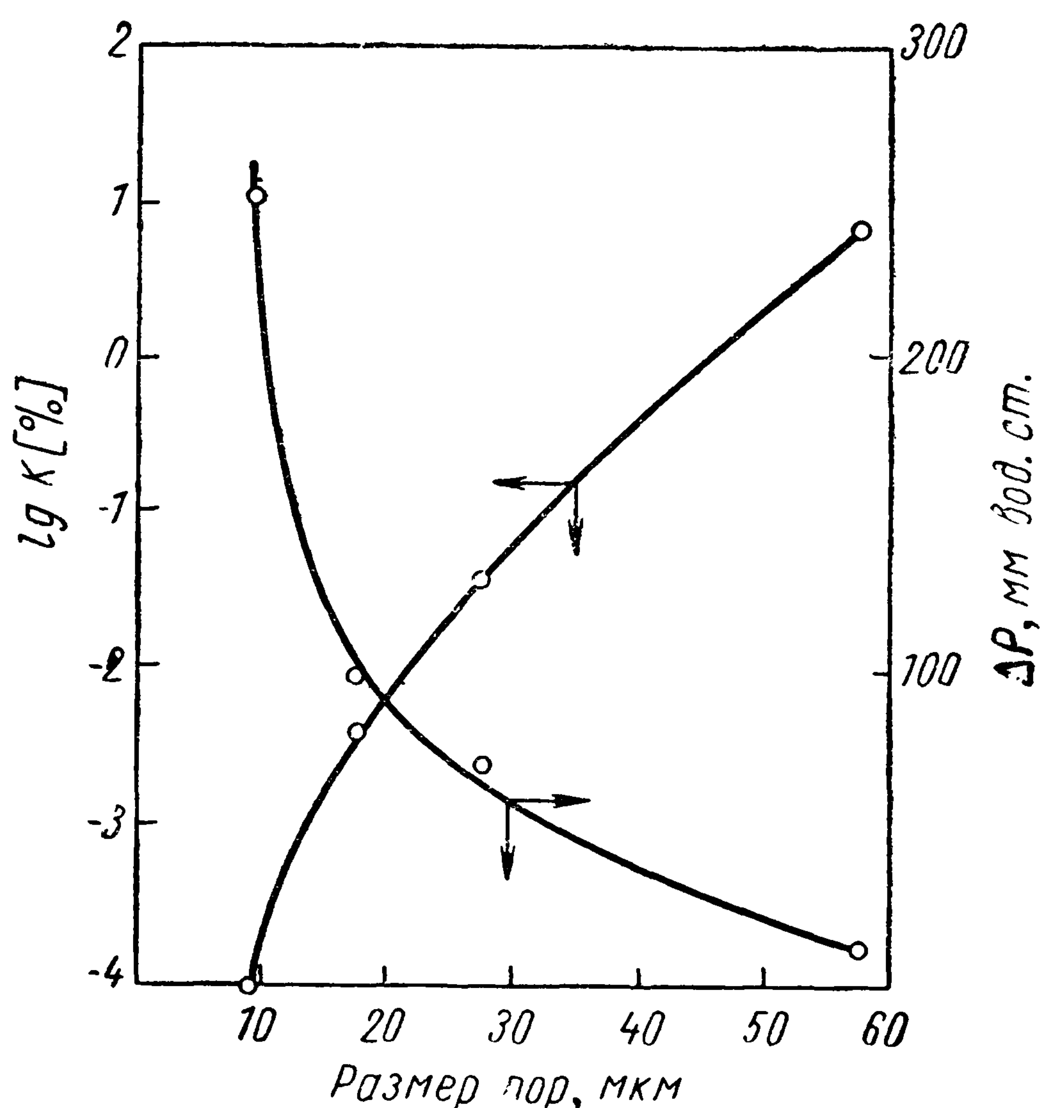


Рис. 4.23. Зависимость коэффициента проскока и перепада давления от размера пор керамического фильтра (скорость фильтрации 3 *см/сек*).

тиц по весу 0,6 *мкм* при обычных температуре и давлении приведены на рис. 4.23. Кривые показывают хорошее соответствие между размером пор и коэффициентом проскока.

Кварцевые волокна

Кварцевые волокна применяются в фильтрах цилиндрической формы, они способны противостоять температурам выше 700° С, высоким перепадам давления и термическим ударам.

Металлокерамика

В литературе имеется несколько публикаций о металлокерамических фильтрах, но они, по-видимому, не могут относиться к высокоэффективным, и поэтому детально здесь не рассматриваются.

Другие материалы

Ниже приведены краткие сведения о некоторых материалах, из которых изготовляют волокна.

1. *Кремний*. Конденсационные кремневые волокна получают при пропускании потока газа над расплавленным кремнием с высокой скоростью и при большом давлении. Тонкие волокна можно получать таким образом в промышленном масштабе и из них можно вырабатывать бумагу. Температура размягчения их лежит в области 1600° С, так что они применимы для высокотемпературной фильтрации.

2. *Микрокварц* (волокна с высоким содержанием кремния). Изготовляются очень тонкие волокна, даже субмикронного размера; они устойчивы при температуре до 1300° С, инертны к воде, но разрушаются плавиковой и горячей фосфорной кислотами.

3. *Кианит* (силикат алюминия). Кианитовые волокна могут быть изготовлены диаметром 1—5 *мкм*, они стабильны при 1100° С.

4. *Каолиновая шерсть*. На основе каолина приготовляют смесь примерно равных частей кремнезема (Al_2O_3) и двуокиси кремния со следами других веществ.

5. *Титанат калия*. Могут быть изготовлены и переработаны в бумагу волокна с температурой плавления 1371° С размером от 1 до 200 *мкм*.

6. *Углерод*. Изготовляют волокна диаметром 10 *мкм*.

7. *Металлические волокна*. В США изготовлены бумаги спечением смеси стальных и алюминиевых волокон.

Очевидно, для изготовления фильтров будут использоваться не все эти материалы, но некоторые из них представляют несомненный практический интерес. Весьма перспективны высокотемпературные фильтры, снаряжаемые смесью асбестовых и керамических волокон в керамическом корпусе. Имеются сообщения, что такие фильтры работают при температуре 1000° С.

ФИЛЬТРЫ ГРУБОЙ ОЧИСТКИ

В фильтрах грубой очистки используется много различных материалов, включая металлические грубые волокна или стружки, козий волос и хлопок. Эффективность этих фильтров значительно увеличивается при покрытии улавливающих элементов тонкой пленкой масла, образующей липкую поверхность. Сухие металлические грубые волокна используются для улавливания искр, а также в качестве пламегасителей в высокотемпературных вентиляционных системах для защиты высокоэффективных фильтров. Проклеенные слои из синтетических волокон (например, лавсана) обеспечивают высокую эффективность улавливания жидких частиц диаметром 5 *мкм* и более при очень высоких скоростях потока. Например, волокнистый слой площадью 12 *м*² был уложен в глубокие складки (глубиной до 30 *см*) и упакован в корпус с площадью по-

перечного сечения 2,8 *м*^{2}; фильтр имел $\Delta P = 5$ *мм вод. ст.* при производительности 570 *м*^{3}/*мин*.

Материалы грубой очистки должны: иметь низкое сопротивление; обеспечивать значительную защиту от забивания высокоэффективных фильтров; иметь высокую пылеемкость до того, как сопротивление поднимется выше экономически допустимых пределов; быть относительно дешевыми по сравнению с высокоэффективными фильтрами.

Из первых двух требований следует, что плотность упаковки этих материалов должна быть значительно меньше, чем у обычных высокоэффективных материалов, а из третьего, что осаждение частиц должно идти в глубине фильтра.

Защита, обеспечиваемая грубоволокнистыми материалами

Прежде чем рассматривать грубоволокнистые материалы и способы их использования, полезно оценить, какую степень очистки обеспечивают предфильтры, снаряжаемые стекловолокном типа 1 и

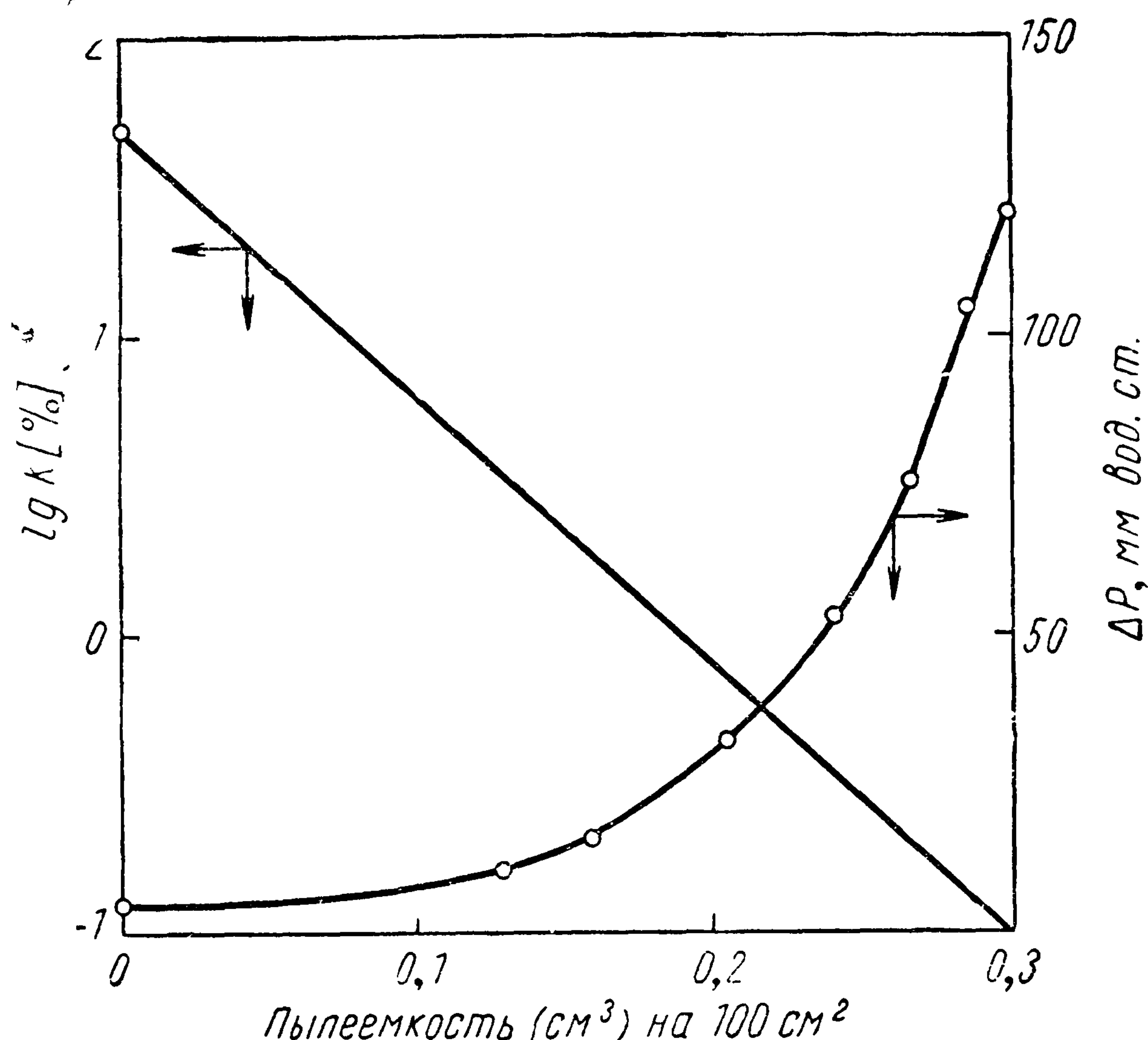


Рис. 4.24. Зависимость коэффициента проскока и перепада давления от пылеемкости для материала предфильтра (материал: тип 1 — 4 *г*/100 *см*^{2}; тип 2 — 13 *г*/100 *см*^{2}, толщина — 0,64 *см*, скорость — 5 *см*/*сек*)

2 и имеющие в лобовых слоях более грубые волокна. На рис. 4.24 приведены зависимости ΔP и K от пылеемкости для таких предфильтров, имевших по стандартному аэрозолю метиленовой голубой $K = 50\%$. Забивание производилось этим же аэрозолем. После

осаждения на каждые 100 *см*^{2} поверхности почти 0,3 *см*^{3} частиц перепад давления на материале возрос от 5 до 120 *мм вод. ст.* и конечный коэффициент проскока достиг 0,1%. Расчеты, проведенные на основе зависимости ΔP от пылеемкости, показали, что за период испытаний предфильтр уловил почти 90% общего объема пыли. На рис. 4.11 показано забивание тем же аэрозолем хлопко-асбестового материала. Рост сопротивления хлопко-асбестового слоя, работающего в комбинации с предфильтром, хорошо согласуется с расчетами: только 10% аэрозольных частиц проникало через предфильтр, причем более резкое возрастание ΔP наблюдалось в начальный период, когда предфильтр имел низкую эффективность.

Результаты аналогичного опыта, проведенного с полидисперсными частицами (медианный весовой размер частиц 2 *мкм*), показали, что при увеличении перепада давления до 170 *мм вод. ст.* через предфильтр проникло только 4—5% пыли, объем уловленного осадка составил 0,8 *см*^{3}/100 *см*^{2} [5].

Таким образом, даже в случае субмикронных аэрозолей, имеющих высокую проницаемость, сравнительно плохой фильтрующий материал может служить эффективной защитой для последующих фильтров.

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКО ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

После рассмотрения различных волокнистых материалов, наиболее широко применяемых в высокоэффективных промышленных системах, включая материалы для предфильтров, приведем их сравнительные характеристики (табл. 4.4) и сводную таблицу по их применению (табл. 4.5).

Из табл. 4.4 следует, что хлопко-асбестовые и стекловолокнистые объемные материалы имеют преимущества по сравнению со стеклянными бумагами, но с практической точки зрения бумажные фильтры позволяют разместить большую поверхность в том же самом объеме корпуса.

Принимая коэффициент фильтрующего действия в качестве критерия качества и учитывая возможную степень развертывания поверхности внутри корпуса определенного размера, легко сделать вывод, что стеклянная бумага является лучшим материалом: стеклянная бумага и маты способны лучше противостоять высоким температурам и увлажнению, чем материалы, содержащие хлопок и целлюлозу. Однако, по мнению автора, хлопко-асбестовые маты обладают определенными преимуществами при улавливании высокотоксичных частиц, так как они обычно допускают меньше утечек по краям. Это подтверждено испытаниями складчатых бумажных фильтров, которые имели утечки по местам герметизации, возникшие, по-видимому, при транспортировке от фабрики до лаборатории. К тому же фильтры, снаряжаемые объемными материалами, незаменимы в тех случаях, когда возможны вибрации или удары.

Таблица 4.4

Характеристика широко используемых в промышленности волокнистых материалов (скорость воздуха 5 *см/сек*; коэффициент проскока и пылеемкость определялись по аэрозолям метиленовой голубой или хлористого натрия)

Материал	Толщина, *мм*	ΔP, *мм вод. ст.*		Объем осадка на 1 *м²* материала, *см³*	Коэффициент проскока, %		Вес 1 *м²* материала, *г*	*Q*
		начальное	конечное		начальный	конечный		
Шерсть-асбест	12,7	31	38,5	4,4	0,08	0,007	1600	100
Хлопок-асбест	6,3	22	27	4,0	0,02	0,005	660	168
Стеклянная бумага	0,64	23	53	4,0	0,04	<0,0001	107	148
	0,5	23	58,5	4,0	0,05	<0,0001	95	143
	0,76	24,5	39,5	1,9	0,02	<0,0001	95	150
	0,76	34,5	50	1,0	0,0008	<0,0001	102	148
	0,5	29,5	64	4,0	0,004	<0,0001	71	149
	0,5	29,5	33,5	1,0	0,004	<0,0003	71	149
Целлюлозно-асбестовая бумага среднего качества	1,27	36	38,5	4,0	0,03	<0,0001	200	98
Мат из стекловолокна, тип 3	6,4	20,5	25	4,0	0,005	<0,0001	600	210
		20,5	29,5	7,0	0,005	<0,0001	600	
		20,5	80	11,0	0,005	<0,0001	600	
Типы 1 и 2 в комбинации	6,4	5	5,6	1,0	50	10	Тип 1—400	60
		5	7,1	2,0	50	2	Тип 2—130	
		5	150	4,0	50	0,1		

Таблица 4.5

Основное назначение фильтрующих материалов

Материал	Размер частиц		Бактериальные аэрозоли	Радиоактивные аэрозоли	Стерилизуемые фильтры	Высокотемпературные фильтры	Пробоотборные фильтры
	>2 *мкм*	<2 *мкм*					
Хлопок	+	—	—	—	—	—	—
Шерсть со смолой	+	+	—	—	—	—	—
Хлопок-асбест	—	+	+	+	+	—	—
Бумага из эспарто	+	—	—	—	—	—	+
Стекловолокнистые слои:							
грубое волокно	+	—	—	—	—	—	—
тонкое волокно, тип 3	—	+	+	+	+	+	—
Стеклянные бумаги:							
низкоэффективные	+	—	—	+	—	+	+
высокоэффективные	—	+	+	+	—	+	+
Целлюлозно-асбестовая бумага	—	+	+	+	—	—	—
Полипропилен	+	—	—	—	—	—	—
Стиллит	+	—	+	—	+	+	—

ФИЛЬТРАЦИЯ ГЛУБОКИМИ СТАЦИОНАРНЫМИ И ПСЕВДООЖИЖЕННЫМИ ЗЕРНИСТЫМИ СЛОЯМИ

Глубокие слоевые фильтры изготовляются из песка или дробленого угля, обычно отсортированного таким образом, что аэрозоли сначала пропускаются через более грубые зерна. Они используются для фильтрации мокрых агрессивных аэрозолей, когда обычные фильтрующие материалы непригодны. Для достижения высокой эффективности при низком перепаде давления и большой производительности необходимо применять глубокие слои с чрезвычайно большой лобовой поверхностью, что увеличивает их стоимость. Сильверман [6] сообщил, что эффективность очистки дробленым углем сернокислотного тумана с частицами размером 0,5—3 *мкм* может достигать 99,9 вес. %. Кроме того, имеется сообщение о том, что на радиохимических операциях для очистки вентиляционных газов из технологических камер успешно использовался большой песчаный фильтр объемом $33 \times 15 \times 4{,}2$ *м* со слоем отсортированного песка глубиной 1,72 *м*.

Сообщалось также об использовании слоевых зернистых фильтров для стерилизации воздуха, применяемого для аэробной ферментации в производстве пенициллина. Механизмы фильтрации в этих фильтрах еще не выяснены. Так как поры между зернами намного больше, чем подлежащие улавливанию частицы примесей, то вероятными механизмами являются эффекты зацепления и диффузии. Хотя абсолютная стерилизация, т. е. полное удаление жизнеспособных организмов, в таких случаях не требуется, необходимо получать очень высокую эффективность. Рудин [7] считает, что для фильтра, состоящего из слоя угольных гранул зернением 1,2—2,0 *мм* высотой 1,5 *м* при скорости в расчете на полное сечение 15 *см/сек* типичным является проскок одного организма на 100 000.

Многие другие материалы применяются в глубоких слоевых фильтрах, но только в качестве фильтров с низкой эффективностью или для улавливания частиц крупнее 1 *мкм*. Это щетина, металлические стружки, древесные опилки, минеральная силикатная шерсть, грубое стекловолокно.

Псевдоожиженные слои в качестве фильтров использовались, по-видимому, только в лабораторных экспериментах, однако было опубликовано два сообщения по исследованию эффективности улавливания ими жидких аэрозолей. Мейснер и Миклей [8] пропускали сернокислотные туманы, содержащие частицы размером 2 — 14 *мкм*, через слои силиката алюминия, песка, стекла и активированной окиси алюминия и установили, что непористые материалы вскоре покрываются пленкой кислоты и делаются липкими, так что слипание разрушает флюидизацию. При скорости выше 90 *см/сек* эффективность была более 90% при $\Delta P = 150$ *мм вод. ст.* Скотт и Гатри [9] изучали осаждение частиц диоктилфталата диаметром около 1 *мкм* псевдоожиженными слоями силикагеля. Эффектив-

ность улавливания изменилась от 70 до 90%. Они также пришли к выводу, что псевдоожиженные слои могут применяться в пыле- и туманоулавливающих устройствах.

ПРОБООТБОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Хорошие фильтрующие пробоотборные материалы должны улавливать частицы всех размеров, причем в случае анализа дисперсности на лобовой поверхности. Но часто из практических соображений применяют относительно плохие материалы. Дело в том, что для сокращения продолжительности пробоотбора необходимо поддерживать высокие объемные скорости, но в этих условиях высококачественные бумажные фильтры оказывают слишком высокое сопротивление. Стремление снизить сопротивление вынуждает применять малоэффективную бумагу. Содержание золы в пробоотборных материалах, подвергаемых сожжению, должно быть низким; они должны иметь однородное строение и цвет, если проводится оптическая оценка (например, измерение степени потемнения или интенсивности цвета в случае испытаний по метиленовой голубой). В некоторых случаях они должны легко растворяться или образовывать однородные пленки, не изменять веса с изменением влажности, если оценка концентрации аэрозолей осуществляется весовым методом.

Основными механизмами улавливания субмикронных частиц в высококачественных фильтрах являются эффекты диффузии и зацепления. При пробоотборе применяются повышенные скорости, снижающие диффузионный эффект и порождающие инерционные силы, которые становятся определяющими. Действительно, только благодаря инерционному эффекту многие пробоотборные бумаги являются приемлемыми. В качестве примера можно указать на использование бумаги из эспарто для испытаний по аэрозолю метиленовой голубой (см. гл. VI). Эффективность бумаги по нефильтрованному аэрозолю метиленовой голубой (медианный весовой размер частиц около 0,6 *мкм*) при $v = 10$ *см/сек* составляет приблизительно 20 вес. %, но при скорости 500 *см/сек* эффективность возрастает до 80%. Эта эффективность относительно постоянна при отборе проб аэрозоля метиленовой голубой после фильтров с коэффициентом проскока не ниже 0,1%; однако для аэрозоля, выходящего из более совершенных фильтров, эффективность бумаги эспарто значительно падает и составляет только 20% после фильтров с $K = 0{,}001\%$. Такая низкая эффективность объясняется тем, что инерционный эффект очень мелких частиц, проникающих через высокоэффективные фильтры, очень мал, а скорость слишком велика, чтобы захват частиц происходил за счет диффузии. Таким образом, бумага эспарто удовлетворяет требованиям весового пробоотбора аэрозолей с медианным весовым размером частиц от 1 *мкм* и является плохим материалом для частиц размером 0,2—0,3 *мкм*.

Таблица 4.6

Влияние скорости на перепад давления и коэффициент проскока по туману диоктилфталата для различных пробоотборных материалов

К, %; Δ Р, мм вод. ст.	Линейная скорость потока, см/сек	Асбесто-целлюлозный картон				Бумажные химические фильтры ватмана									Мембранные фильтры		Минеральные фильтры		Отформованные целлюлозные конусы
		№ 1	№ 6	№ 9	№ 18	№ 1	№ 4	№ 32	№ 40	№ 41	№ 41Н	№ 42	№ 44	№ 50	НА	АА	стекло-асбест	стекло-волокно	
К	0,5	0,022	0,015	5,0	0,47	73,0	84,0	3,7	32,0	89,0	93,0	5,0	6,5	30,0	0,002	0,002	0,029	0,008	45,0
Δ Р		18	17	26	30	47	12,5	180	62	8	11	217	192	237	135	55	18	19	7
К	5	0,036	0,023	5,0	0,53	68,0	81,0	3,0	26,0	84,0	89,0	209	4,5	13,0	0,052	0,002	0,002	0,020	50,0
Δ Р		36	36	55	61	84	23	365	128	17	22	425	385	442	282	108	363	303	8
К	10	0,045	0,04	3,5	0,65	43,0	77,0	0,45	16,0	77,0	81,0	0,75	1,4	3,0	0,01	0,002	0,071	0,038	52,0
Δ Р		72	72	115	123	192	49	682	247	35,7	47	825	715	880	540	210	75	762	26
К	14	0,055	0,057	2,0	0,09	27,0	73,0	0,35	8,0	75,0	76,0	0,22	0,5	0,9	0,015	0,01	0,073	0,05	52
Δ Р		105	100	157	171	265	70	950	375	50	67	1160	1000	1212	775	295	106	106	40
К	25	0,045	0,045	1,7	0,45	11,0	62,0	0,3	2,8	67,0	65,0	0,02	0,2	0,15	0,015	0,015	0,08	0,051	51,0
Δ Р		167	187	235	325	490	137	1730	632	95	137	2025	1778	2150	1490	612	195	192	75
К	50	0,031	0,037	0,2	0,1	1,2	25,0	—	0,23	44,0	34,0	—	—	—	—	0,02	0,04	0,025	45,0
Δ Р		442	422	545	675	1012	287	—	1350	202	279	—	—	—	—	975	400	380	162
К	75	0,021	0,018	0,1	0,025	0,3	12,0	—	—	29,0	21,0	—	—	—	—	—	0,018	0,013	34,0
Δ Р		562	437	862	955	1500	452	—	—	412	425	—	—	—	—	—	667	625	280
К	100	0,011	0,01	—	—	—	—	—	—	15,0	13,0	—	—	—	—	—	—	—	28,0
Δ Р		737	875	—	—	—	—	—	—	445	600	—	—	—	—	—	—	—	407

Скорости пробоотбора

Пробоотбор субмикронных частиц при скоростях, в шесть раз больших или меньших скорости в газоходе, является вполне допустимым, если сам фильтрующий материал эффективен по частицам такого размера при этих скоростях. Инерция частиц мала, и они следуют по линиям тока, поэтому фильтр обеспечивает пробоотбор, достаточно близкий к точному. Таким образом, фильтры, допускающие при пробоотборе скорости, меньшие изокинетических, должны быть высокоэффективными, а осаждение частиц в них должно происходить за счет диффузии и эффекта зацепления. Менее эффективные бумаги или волокнистые слои (набивки) в этом случае могут применяться при скорости более высокой, чем изокинетическая, с преобладающей ролью в осаждении инерционного эффекта. Это хорошо подтверждают данные табл. 4.6, которые взяты из работы [10], посвященной исследованию влияния скорости на сопротивление и коэффициент проскока различных широко используемых пробоотборных сред. Например, при изокинетическом пробоотборе для скорости в газоходе 5 *см/сек* бумага ватман № 1 имела коэффициент проскока 81%, однако при скорости 25 *см/сек* он снизился до 11%. Бумага ватман № 41, которая раньше широко применялась, имеет $K = 67\%$ при $v = 25$ *см/сек* и только $K = 15\%$ при $v = 100$ *см/сек*.

Все это относится к пробоотбору частиц размером меньше 1 *мкм*. При наличии в субмикронных аэрозолях крупных частиц пробоотбор должен проводиться с обязательным соблюдением изокинетичности [11—13]. Если скорость пробоотбора больше скорости в газоходе, то крупные частицы не будут следовать по линиям тока в фильтр и полученное значение концентрации будет меньше действительного. В таких аэрозолях при изокинетическом пробоотборе фильтры посредственного качества будут улавливать крупные частицы, а осаждение мелких частиц будет плохим и для получения представительной пробы нужны высококачественные фильтры. Эти выводы говорят о необходимости четкого планирования пробоотборных программ, без которых могут быть допущены большие ошибки.

Фильтры для дисперсных анализов

Для дисперсного анализа применять обычные пробоотборные фильтры не рекомендуется, так как некоторые частицы проникают внутрь фильтра и их нельзя обнаружить под микроскопом. Другие методы, например с использованием каскадного импактора или термопреципитатора, рассмотренные ранее, более подходят. Фильтры же обычно применяют только для получения общего или относительного веса частиц в данном объеме.

Однако в некоторых особых случаях распределение частиц по размерам может быть получено с использованием пробоотбора на фильтры.

Лири [14], используя метод авторадиографии, впервые измерил размеры α-активных частиц, уловленных высокоэффективной асбестсодержащей бумагой. Аналогичный метод может быть применен в некоторых случаях для пробоотбора радиоактивных веществ из атмосферного воздуха. Для этого аэрозольные частицы улавливаются фильтром, который затем приводят в контакт с фотопленкой на определенную экспозицию. Черные звездочки на проявленной пленке указывают места радиоактивных частиц. После этого участки фильтров, включающие активность, удаляют и размачивают. Затем проводят осаждение на большей поверхности коллодиевой пленки и вторую авторадиографию, при которой частицы распределены на поверхности более свободно. Положение частиц фиксируется, и они могут быть измерены под микроскопом и проанализированы радиометрическими приборами. Этот метод используется в том случае, когда неприменима более простая оценка, особенно при низкой концентрации.

Пористые мембранные фильтры, изготовляемые из эфиров целлюлозы [15, 16], также можно использовать для отбора твердых частиц с целью проведения дисперсного анализа, так как при выборе фильтра с соответствующими размерами пор, которые могут быть 0,01 *мкм* и меньше, почти все частицы осаждаются на лобовой поверхности. Фильтр этого типа более удобен для авторадиографии, чем асбестовая бумага, примененная Лири, так как потери радиации от частиц в этом случае меньше. Мембранный фильтр не является волокнистым материалом в обычном смысле этого слова, он улавливает более крупные частицы главным образом за счет ситового эффекта, а более мелкие частицы осаждаются благодаря диффузии и эффекту зацепления и, возможно, электростатическим силам, так как при прохождении воздуха через поры фильтра на нем возникают заряды. Частицы могут быть зафиксированы на поверхности стекла, если фильтрующий диск поместить на стекло и растворить его в парах ацетона. При этом образуется очень тонкая прозрачная пленка, которая прилипает к стеклу и в которой утоплены частицы. Мембранный фильтр становится прозрачным и при нанесении на его поверхность иммерсионного масла, позволяющего проводить изучение в микроскопе под большим увеличением.

Фильтры для весовых определений

Выбор волокнистого фильтра для весового пробоотбора твердых или жидких частиц с низкой упругостью пара зависит от их размера и величины отбираемой пробы. Чаще всего перед пробоотбором и после него необходимо доводить фильтры до постоянного веса при определенной влажности. Исключением являются случаи, когда вес отбираемой пробы намного больше веса фильтра. Очень низкое влагопоглощение мембранных фильтров делает их очень удобными для гравиметрических определений малых количеств частиц. На рис. 4.25 и 4.26, взятых из работы [17], кривые показывают изме-

нение веса диска мембранного фильтра весом 25 *мг* после удаления его из сушильного шкафа, где он выдерживался в течение 48 *ч*, и после удаления такого же фильтра из атмосферы с относительной влажностью φ около 100%.

Для проведения прямого сравнения характера влияния влажности были подвергнуты такой же обработке два других широко применяющихся образца пробоотборной фильтрующей бумаги из стекловолокна АА и ватман № 1. Очевидно, мембранный фильтр

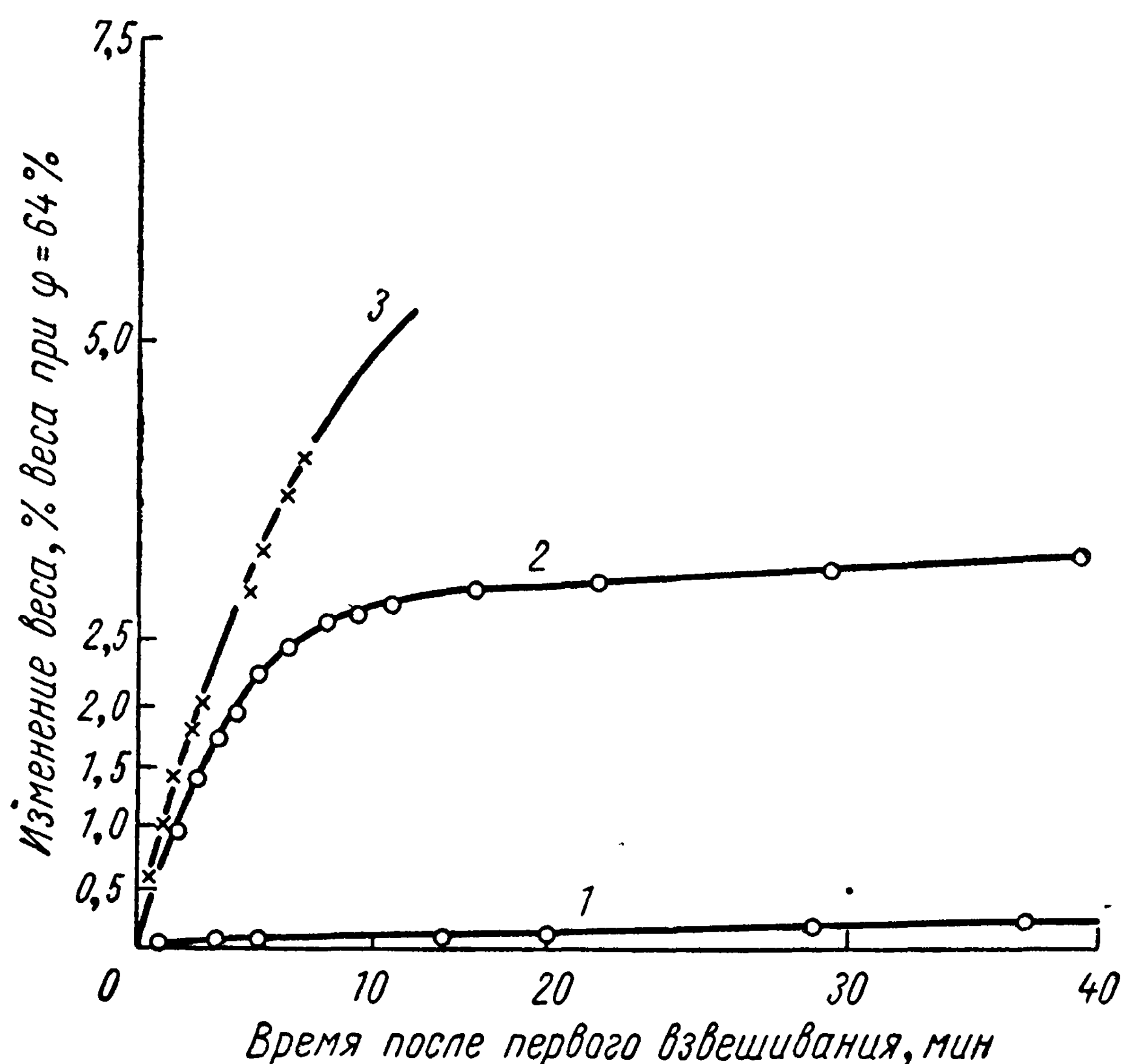


Рис. 4.25. Изменение веса фильтрующего материала после его выдержки в эксикаторе при относительной влажности 64%:

1 — мембранный фильтр НА; *2* — ватман № 1; *3* — стекловолокно АА.

весьма значительно превосходит оба эти материала. Ценными качествами мембранного фильтра являются также ничтожный вес золы после сожжения, малый вес единицы поверхности, растворимость в некоторых органических растворителях и нерастворимость в воде и разбавленных кислотах. Хотя мембранный фильтр отвечает особо высоким требованиям фильтрации, его сопротивление больше, чем у стеклянной бумаги при одинаковом коэффициенте проскока.

Величины эффективностей улавливания при различных скоростях потока для некоторых сортов мембранных фильтров приведены в табл. 4.7.

Для отбора проб с самолетов с большими объемными скоростями используют полистирольные фильтрующие рукава, улавливающие частицы за счет инерционного эффекта. Рукава после отбора проб

Таблица 4.7

Характеристики мембранных фильтров

Тип мембранных фильтров	Размер пор, *мкм*	Расход воздуха в расчете на 100 $см^2$, *л/мин*	Сопротивление, *мм вод. ст.*	Коэффициент проскока по аэрозолю NaCl, %
Миллипор VC	0,1	0,6	100	—
HA	0,45	10	100	<0,0001
RA	1,2	38	100	—
SM	5	70	100	—
Оксойд	—	15	300	<0,0001

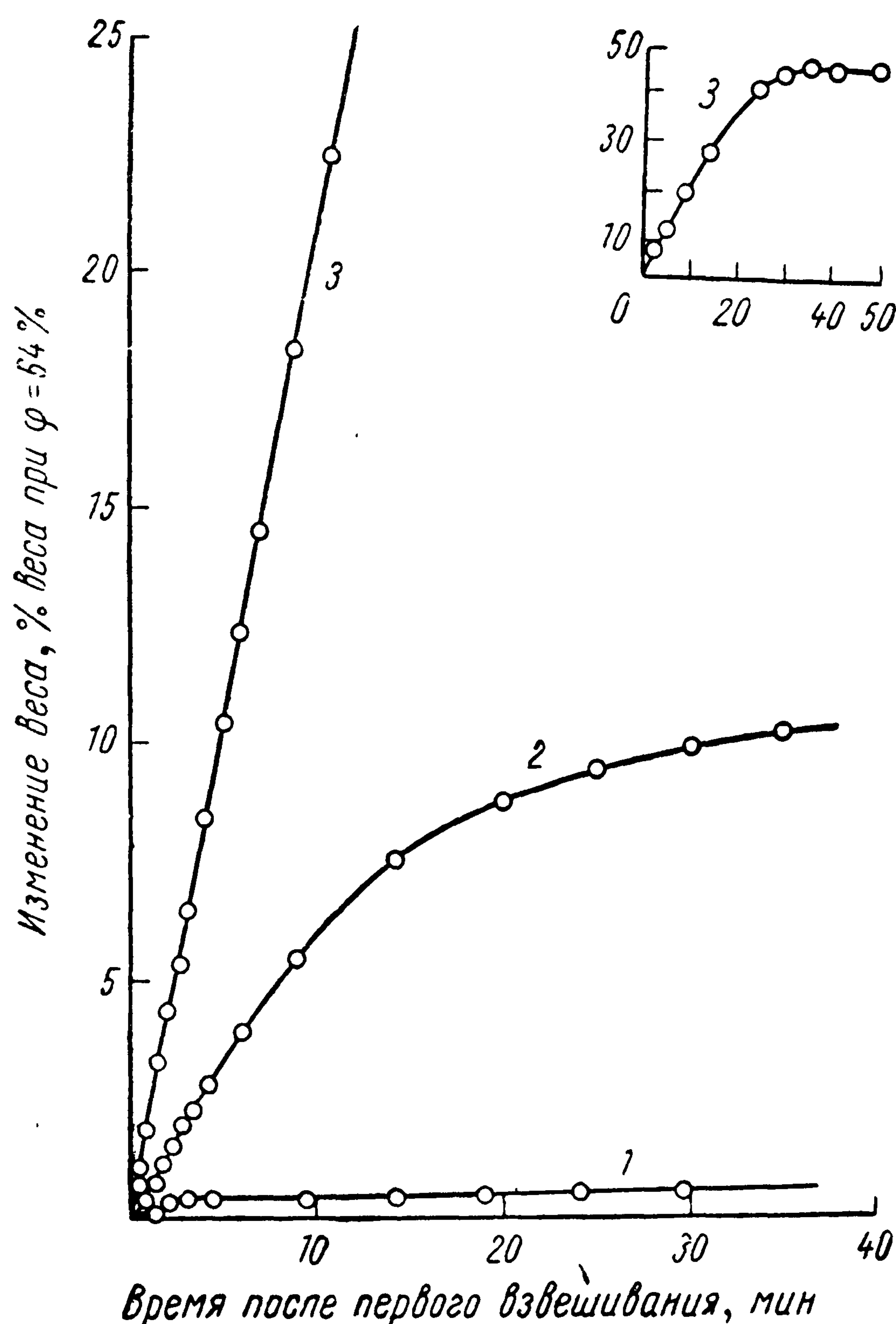


Рис. 4.26. Потери в весе фильтрующего материала при изменении относительной влажности воздуха от 100 до 64% (t = 19° C):

1 — мембранный фильтр HA; *2* — ватман № 1; *3* — стекловолокно AA.

растворяют в толуоле, и твердые частицы подвергают химическому микроанализу.

Фильтры из стекловолокна в виде объемного слоя или бумаги могут успешно применяться для пробоотбора, если доводить их до постоянного веса до и после пробоотбора или в тех случаях, когда уловленный материал может быть экстрагирован и подвергнут оценке отдельно от фильтра. Бумаги обеспечивают широкую область эф-

фективностей улавливания частиц как субмикронных размеров, так и более крупных; они могут изготовляться без связующего, так что пробоотбор можно проводить до 500° С. При более высоких температурах применяют фильтры из керамической бумаги или кремневого волокна.

Приведенный выше перечень не исключает применения многих других материалов, которые иногда могут использоваться, но он включает основные фильтры, легко доступные и пригодные для частиц различных размеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Green H., Thomas D. Brit. Pat **727**, 975 (1955).
2. Wente V. Industr. and Engng Chem., **48**, 1342 (1956).
3. Yeates L. 1960 (не опубликовано).
4. Silverman L. Trans. 21st. Ann. Mtg. Industr. Hyg. Fdn., 1956.
5. Trotman C. 1962 (не опубликовано).
6. Silverman L. Chem. Engng Progr., **47**, 9, 462 (1951).
7. Rudin R. Instn. mech. Engrs, Symp. on Dust Control and Air Cleaning, 1963.
8. Meissner H., Mickley H. Industr. and Engng Chem., **41** 1238 (1949).
9. Scott D., Guthrie D. Canad, J. Chem. Engng, **37**,200 (1959).
10. Smith W., Surprenant N. Proc. Amer. Soc. Test. Mater., **53**, 1122 (1953).
11. Stairmand C. Trans. Instn Chem. Engrs, Lond., **29**, 15 (1951).
12. Green H., Lane W. Papticulate Clouds Dusts, Smokes and Mists. Lond., 1957, Spon.
13. Badzioch S. Inst. Fuel, **33**, 230 (1960).
14. Leary J. Industr. and Engng Chem., **23**, 850 (1951).
15. Goetz A. Amer. J. Public. Health, **43**,150 (1953).
16. First M., Silverman L. Archs Industr. Health, **7**, 1, (1953).
17. Blyth D., Lane W. 1954 (не опубликовано).

Глава V

КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ

Эта глава посвящена некоторым проблемам, возникающим при конструировании фильтров, обзору типовых конструкций и практическим задачам, относящимся к монтажу и эксплуатации фильтров.

Конструирование и доводка фильтров велись одновременно с разработкой используемых в них материалов. Примером усовершенствования конструкции фильтра, связанного с разработкой фильтрующей среды, может служить фильтр с асбесто-шерстяным материалом (рис. 5.1). Использование этого материала и шерстяно-смоляного аналогично.

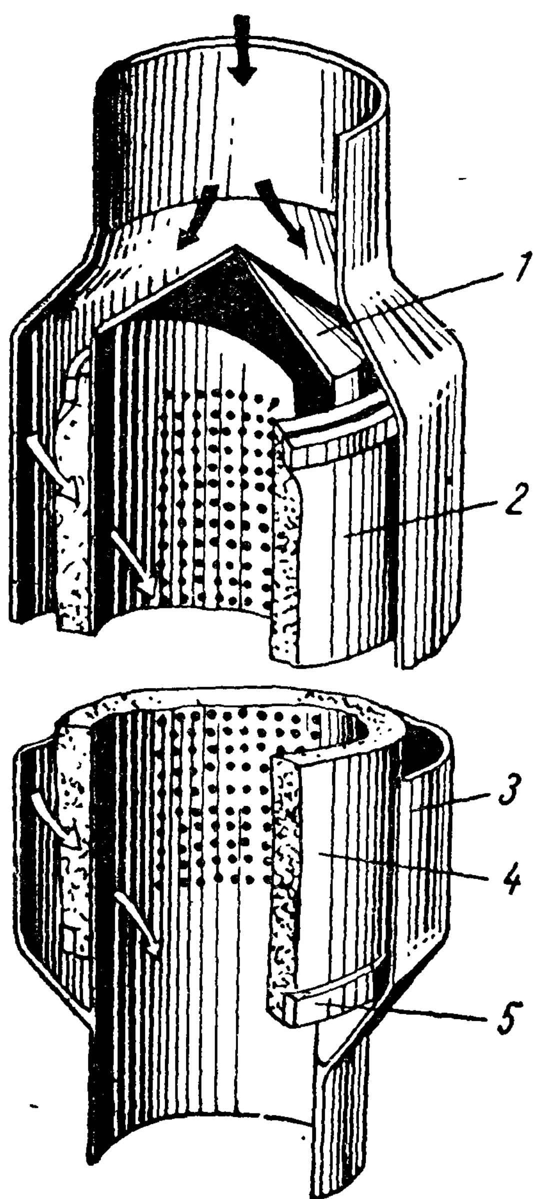


Рис. 5.1. Цилиндрический асбесто-шерстяной фильтр:

1—перфорированная труба; *2*—сетка; *3*—корпус; *4*—шерстяно-смоляной или асбесто-шерстяной фильтрующий материал; *5*—хомут.

Фильтр диаметром 330 *мм* и длиной 1400 *мм* имеет производительность 62 $м^3/ч$, сопротивление 25 *мм вод. ст.* и коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой — 0,001 %. Производительность такого же фильтра, снаряженного шерстяно-смоляным материалом, равна 340 $м^3/ч$. Эти фильтры можно компоновать в одну установку, как показано на рис. 5.9. Расчеты показывают, что для монтажа установки производительностью 3400 $м^3/ч$ необходимо 55 фильтров с асбесто-шерстяным материалом, которые при шаге 380 *мм* занимают площадь 8 $м^2$.

Легко представить, какая сложная проблема возникает при устройстве вытяжной системы производительностью, например, 85 000 $м^3/ч$. Необходимость использования значительного количества фильтров для очистки больших объемов воздуха выдвигает новые задачи по их обслуживанию и удалению фильтрующего материала, что

особенно важно при улавливании радиоактивных и высокотоксичных веществ.

Так как установки, снаряженные фильтрами с асбесто-шерстяным материалом, занимали много места и оказались неудобными в эксплуатации, были проведены исследования возможности создания фильтров с такими же характеристиками, но значительно меньших размеров в плане. В результате был разработан фильтр с прямоугольным корпусом, снаряжаемым асбесто-хлопковым материалом (50% хлопка и 50% асбеста), имеющим меньшую толщину и лучшую структуру. Более тонкий слой фильтрующего материала позволил использовать развернутую форму фильтрующих элементов.

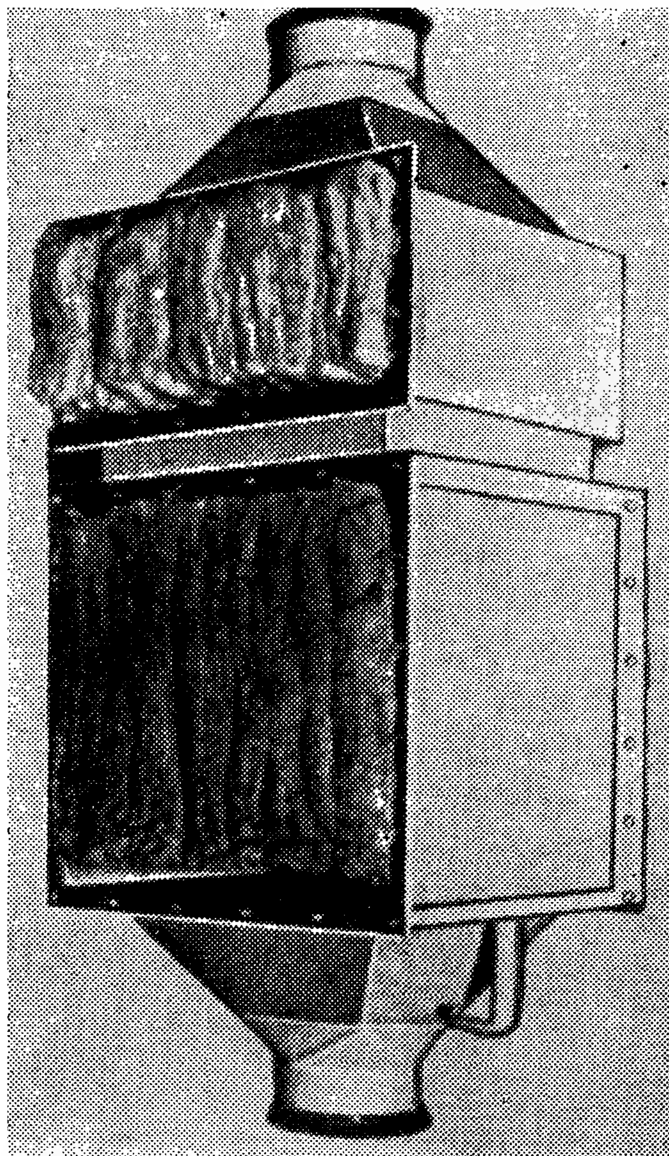


Рис. 5.2. Двухступенчатый хлопко-асбестовый фильтр коробчатого типа.

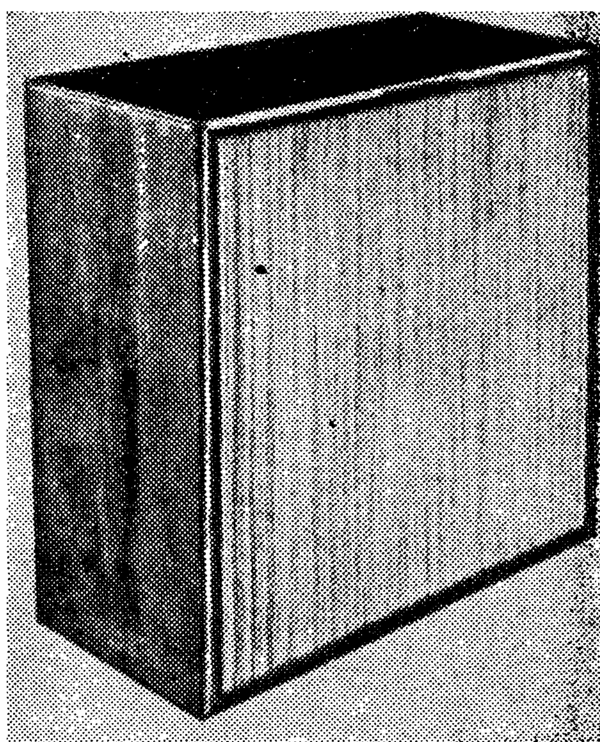


Рис. 5.3. Целлюлозно-асбестовый фильтр в деревянном корпусе.

Вместо укладки на цилиндр (форма, при которой непроизводительно используется площадь помещений при компоновке установок) фильтрующий материал значительно большей площади укладывается в складки, между которыми вставляются разделители. Фильтр в виде куба со сторонами размером 450 *мм* имеет производительность 340 $м^3/ч$, сопротивление 25 *мм вод. ст.* и эффективность по аэрозолю метиленовой голубой 99,9%.

На рис. 5.2 показан двухступенчатый фильтр с хлопко-асбестовым материалом в прямоугольном корпусе. Первой ступенью (половина высоты секции) является предфильтр, в котором в качестве среды используется тонкая стекловата. Возвращаясь к прежнему примеру, можно подсчитать, что при производительности системы 3400 $м^3/ч$ потребовалось бы 10 фильтров с хлопко-асбестовым ма-

териалом, которые заняли бы площадь 3,6 $м^2$. Таким образом, усовершенствование фильтра экономит 50% площади по сравнению с фильтром с асбесто-шерстяным материалом (помимо снижения веса). Кроме того, количество фильтров с 55 сокращается до 10.

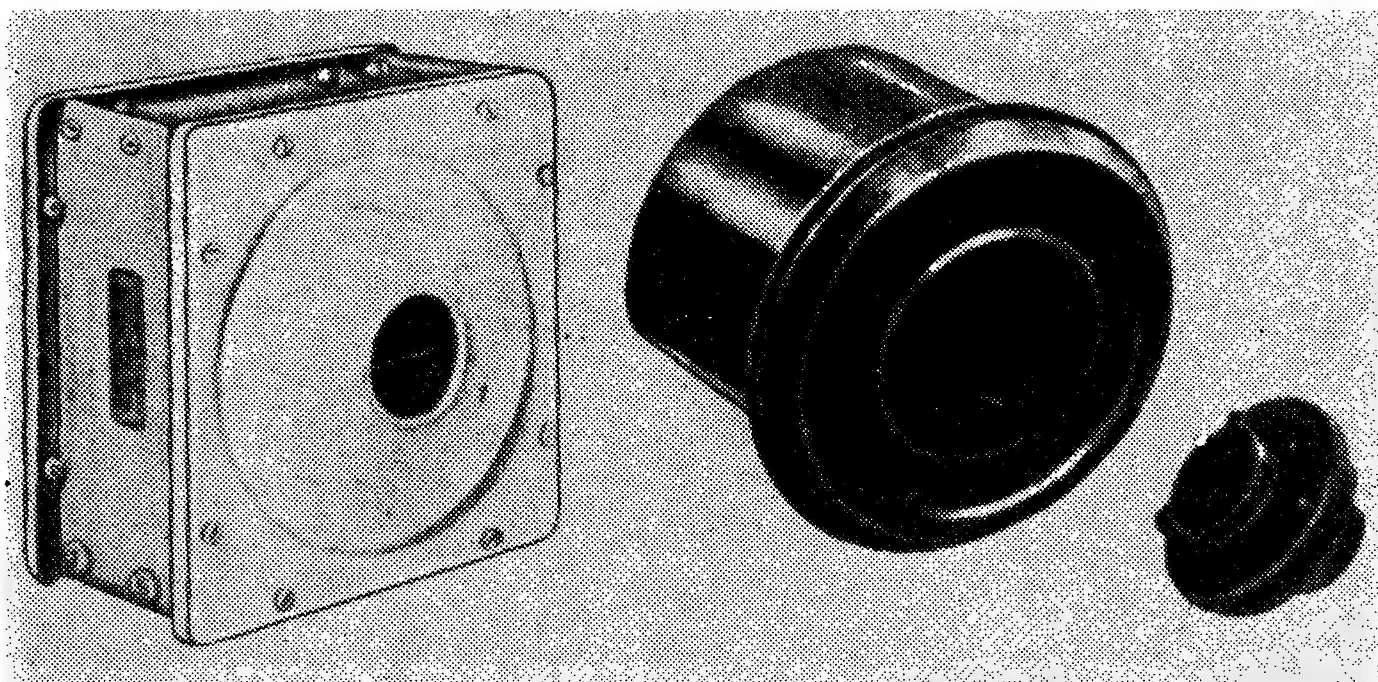


Рис. 5.4. Фильтр для перчаточных боксов.

Фильтры со слоевыми материалами обычно имеют металлические корпуса. Однако во многих случаях они оказываются относительно дорогими, и для фильтра с асбестоцеллюлозной бумагой был разработан деревянный корпус. Типичная конструкция такого фильтра показана на рис. 5.3. Фильтр имеет следующие характеристики: производительность 1700 $м^3/ч$, сопротивление 25 *мм вод. ст.*, габариты 0,6 × 0,6 × 0,3 *м*. Эффективность фильтра превышает 99,99% по субмикронному аэрозолю; два таких фильтра, установленных последовательно, обеспечивают очистку на 99,999%. Установка из четырех фильтров производительностью 3400 $м^3/ч$ занимает площадь менее 0,93 $м^2$.

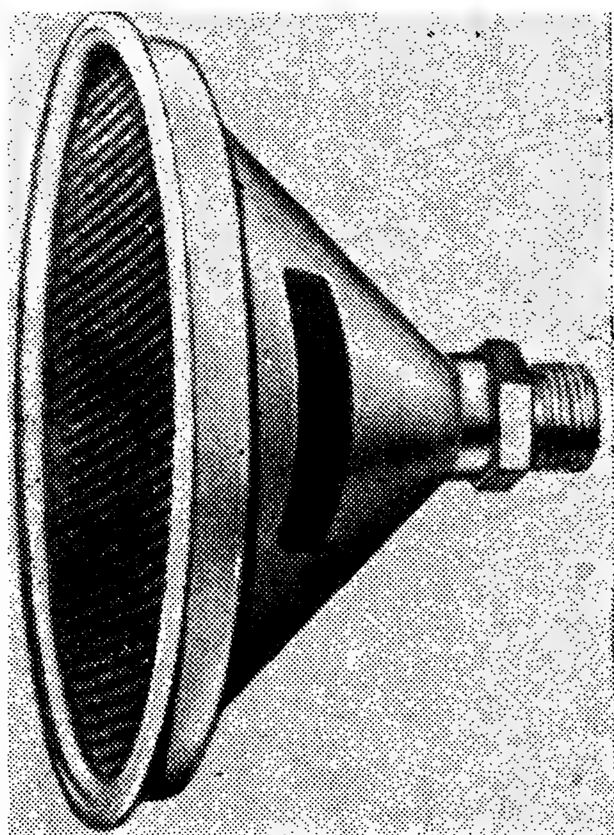


Рис. 5.5. Фильтр для автоклава-стерилизатора.

Известны и другие типы высокоэффективных фильтров, которые используются в специальных случаях. Например, фильтр, показанный на рис. 5.4, был разработан для применения в перчаточных боксах, которые широко используются на предприятиях атомной, бактериологической и фармацевтической промышленности. Эффективность этих фильтров 99,998%. Они используются для улав-

ливания опасных частиц, выходящих из бокса с газовым потоком, который пропускается через бокс для поддержания в нем определенного газового состава или давления. Фильтрующий материал в прямоугольном корпусе огнестоек, в то время как в цилиндрическом корпусе (более поздняя модель) используется специально разработанный материал, хорошо противостоящий химическому и температурному воздействиям.

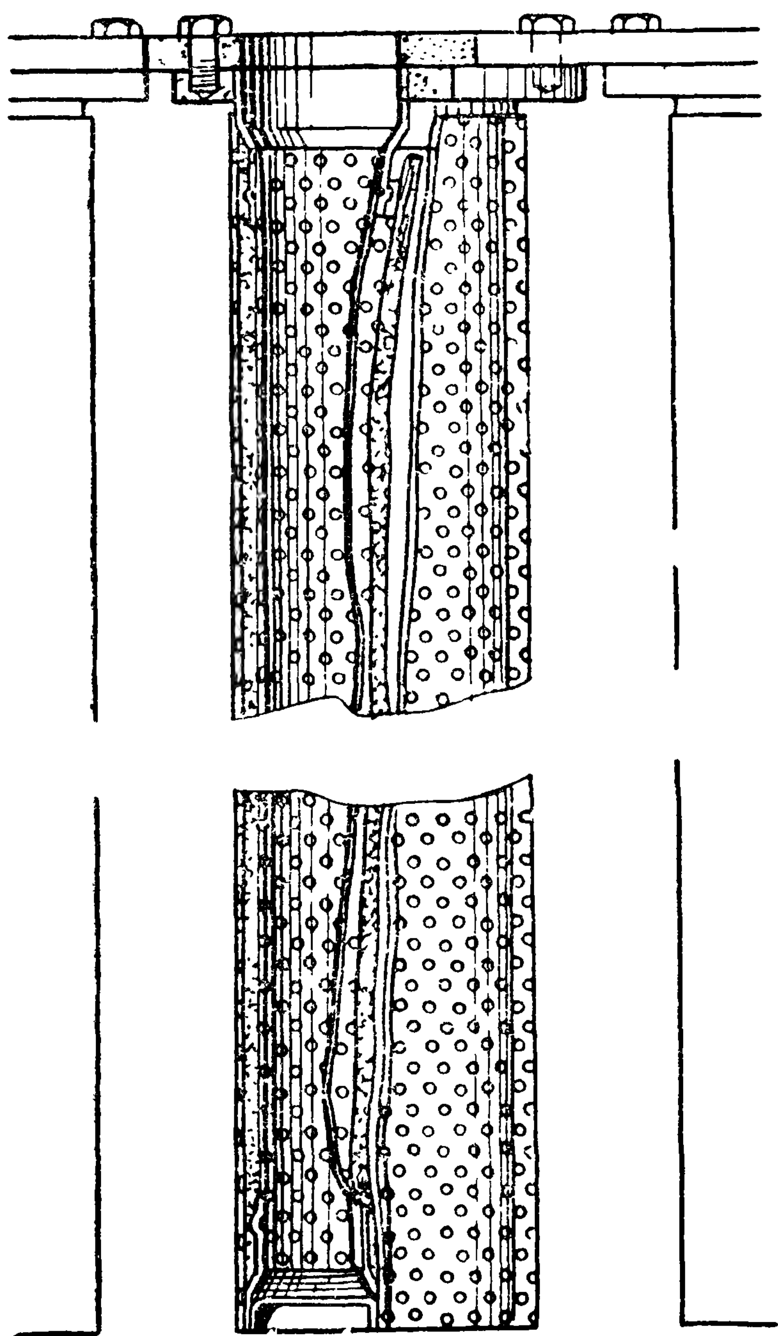


Рис. 5.6. Фильтр из кварцевых волокон.

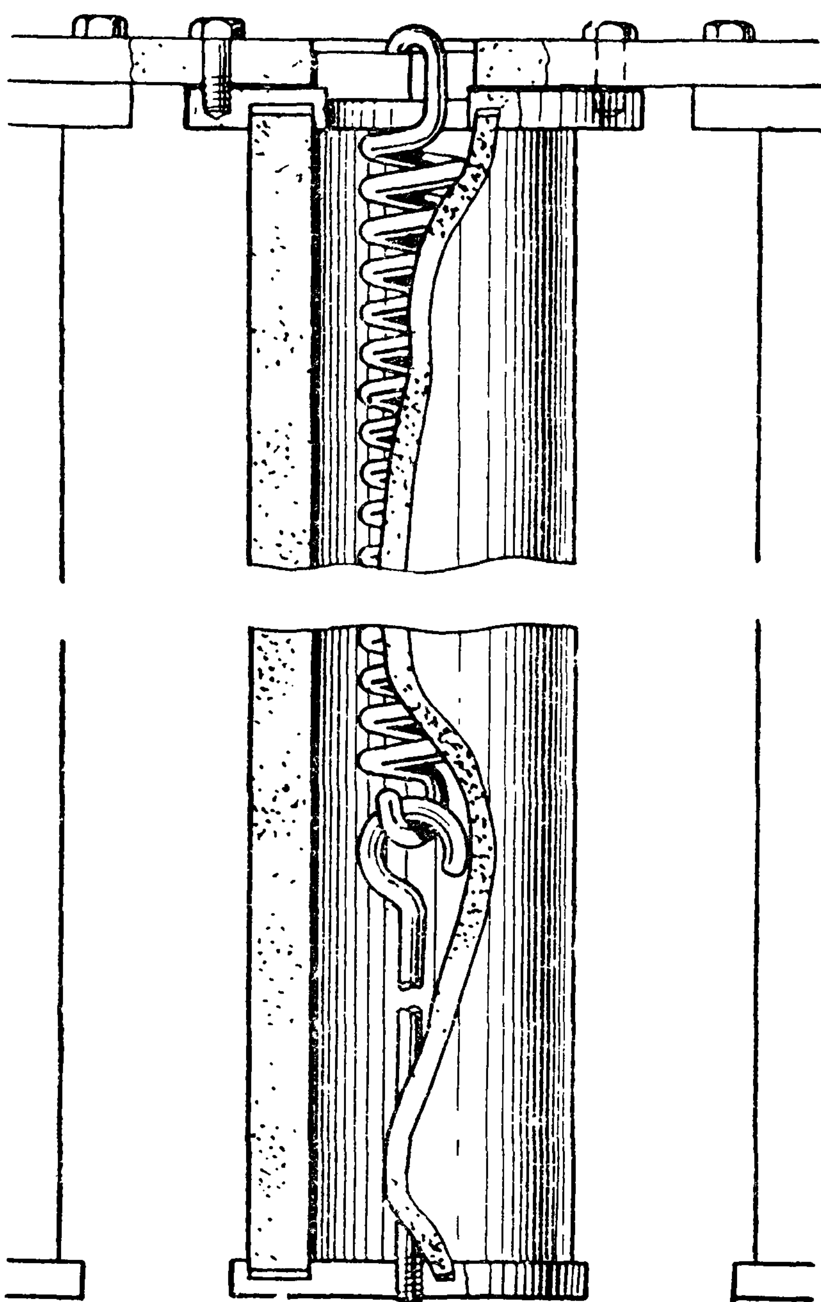


Рис. 5.7. Керамический фильтрующий элемент.

На рис. 5.5 показан специально сконструированный фильтр для медицинских стерилизаторов, где требуется достижение высокой степени чистоты хирургических инструментов и одежды. Фильтрующий элемент состоит из трех слоев материала из очень тонкого стекловолокна, расположенных между стекловолокнистой бумагой. Эти фильтры улавливают все частицы размером более 1 *мкм*, а их эффективность по аэрозолю метиленовой голубой составляет 99,998%. Такая степень очистки отвечает требованиям большинства операций стерилизации.

В другом типе фильтра, пригодном для работы при температуре до 750° С, в качестве фильтрующего материала используются специально обработанные кварцевые волокна. Фильтр цилиндрической формы (рис. 5.6), эффективность по аэрозолю метиленовой голубой

составляет 80%. Этот фильтр особенно удобен в тех случаях, когда возможно резкое изменение температуры; он выдерживает внезапное увеличение перепада давления до 2,8 *кг/см*². Установки этого типа используются на атомных электростанциях в качестве фильтров в контуре CO_2 (при сбросе газа).

Фильтр имеет очень большое гидравлическое сопротивление и обычно применяется в системах с высоким давлением, где потери давления на фильтре относительно невелики.

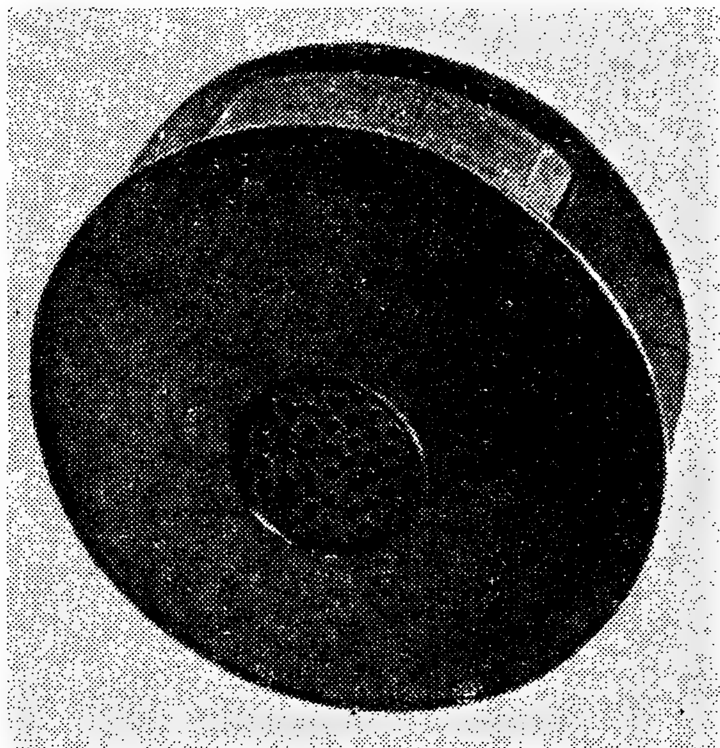


Рис. 5.8. Фильтр из стекловолокнистой бумаги, устанавливаемый в системе наддува в кабине самолета.

Керамические материалы также применяются для снаряжения высокоэффективных фильтров. Типичная установка в форме патрона показана на рис. 5.7. Эти патроны имеют эффективность по аэрозолю метиленовой голубой 75—80% и могут работать при температуре до 500° С. Они выдерживают резкое повышение температуры и, как и кварцевые фильтры, имеют большое сопротивление. Эти фильтры также используются в контуре CO_2 на атомных электростанциях.

Фильтр, снаряженный стекловолокнистой бумагой, показан на рис. 5.8. Этот фильтр используется в системах наддува кабины самолета для защиты от табачной смолы и других веществ чрезвычайно чувствительных механизмов Шредера и пластинчатых клапанов, имеющих перемещения всего 0,0025 *мм*.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И УСТРОЙСТВО ФИЛЬТРОВ

Фильтры с асбесто-шерстяными и шерстяно-смоляными материалами

При конструировании фильтров, снаряжаемых асбесто-шерстяными или шерстяно-смоляными материалами, прежде всего следует определить вид фильтрующей среды. В обоих случаях волокна обрабатываются на кардочесальных и фальцевальных машинах, которые накладывают один на другой слои тонко расчесанных волокон до получения материала требуемого веса. Этот метод позволяет изготовлять материалы толщиной до 130 *мм* с равномерной плотностью. Для выработки фильтрующей среды с заданными характеристиками проводят контролируемое уплотнение слоя до 12—25 *мм*. Единственно приемлемым решением при заводском изготовлении фильтров с таким материалом является его намотка на перфорированный цилиндр с одним открытым торцом, при обеспечении постоянного

давления во время намотки. К открытому торцу подсоединяется специальное натяжное устройство, а поджатие с постоянным усилием обеспечивается прочным муслином. Достаточное количество волокон позволяет получать фильтры без изъянов. Такая технология гарантирует герметичность фильтра в месте контакта слоя со стенками корпуса. Ширина фильтрующей среды, свернутой трубой, больше длины перфорированного цилиндра на ширину сплошных стенок цилиндра, по которым труба зажимается стальными хомутами.

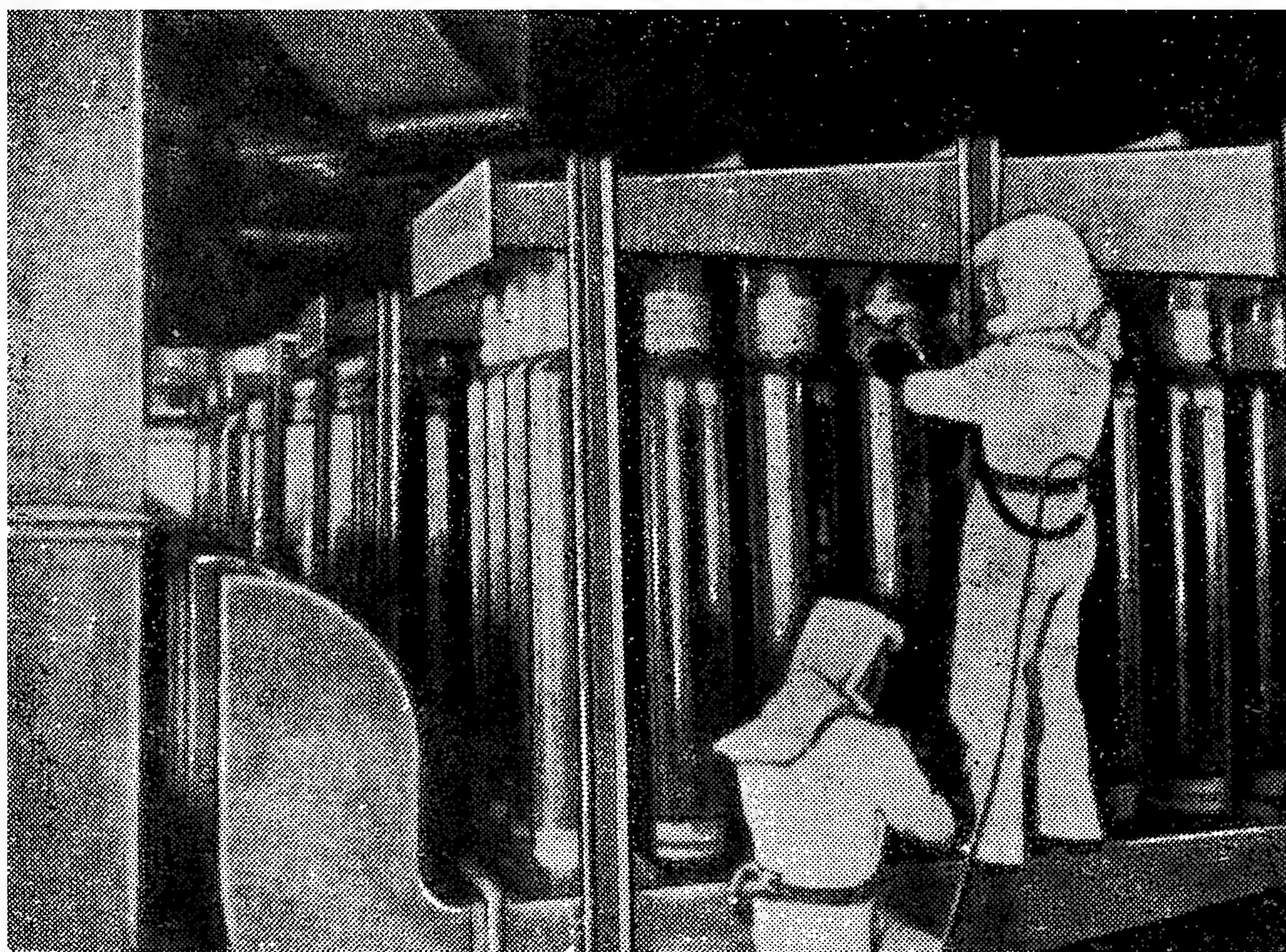


Рис. 5.9. Установка шерстяно-смоляных фильтров.

Далее цилиндр устанавливают в стальной цилиндрический кожух и крепят его сваркой или на болтах в зависимости от того, будет фильтрующий элемент уничтожаться или заменяться. Газ поступает в открытый конец кожуха, проходит через фильтрующую среду и выходит через открытый конец перфорированной трубы (см. рис. 5.1). Фильтры компонуются в батареи с общими верхним и нижним коллекторами, причем количество фильтров зависит от требуемой производительности.

Соединение секций с коллекторами фланцевое или телескопическое, уплотнение обеспечивается резиновыми манжетами. Верхний конец обычно имеет телескопическую конструкцию соединения для облегчения замены. На рис. 5.9 показана батарея из таких секций.

Фильтры цилиндрической формы удовлетворительно эксплуатируются в течение многих лет. В тех случаях, когда требуется применять более прочные материалы (для работы под давлением), используют фильтры этого типа, снаряженные фильтрующими материалами из стеклянных, керамических или кварцевых волокон.

Однако использование фильтров с асбесто-шерстяным материалом (длина 1400 *мм*, диаметр 330 *мм*, производительность 57 $м^3/ч$) не всегда целесообразно ввиду высокой стоимости и больших габаритов. Такого типа фильтры не могут быть использованы для очистки в тех производствах, где унос волокон из фильтров серьезно влияет на технологические процессы. Дело в том, что короткие волокна среды при фильтрации могут захватываться газовым потоком. Для многих технологических процессов требуется абсолютно чистый приточный воздух. В этих случаях предпочтительно вместо асбесто-шерстяных материалов применять бумаги. Поэтому асбесто-шерстяные и шерстяно-смоляные материалы применяются в основном в фильтрах вытяжных систем, где эффект миграции волокон имеет меньшее значение.

Таблица 5.1

Характеристики фильтров цилиндрической формы (диаметр фильтров 330 *мм*, диаметр соединительных патрубков 168 *мм*)

Материал	Длина, *мм*	Производительность, $м^3/ч$	Коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой, %	Сопротивление, *мм вод. ст.*
Шерстяно-смоляной . .	1360	306	0,05	12,7—20,3
	1360	127	0,01	6,4—10,2
Асбесто-шерстяной . .	1360	61,2	0,001	20,3—31,8
	1280	30,6	0,001	10,2—15,2
	1360	170	0,15	20,3—31,8

В табл. 5.1 приведены типичные размеры и характеристики фильтров, снаряженных шерстяно-смоляными и асбесто-шерстяными материалами.

Фильтры с хлопко-асбестовыми материалами

Материал из смеси волокон хлопка и асбеста в равном соотношении, разработанный военно-химической лабораторией, позволил изготовлять фильтры с развернутой поверхностью в относительно малом объеме. Этот материал, расчесанный по той же технологии, что и фильтрующая среда на основе шерсти, в свободном состоянии имеет меньшую упругость. Высота слоя 12,7 *мм*; при сжатии до 6,4 *мм* он имеет характеристики, аналогичные характеристикам материалов на основе шерсти.

Полоса фильтрующего материала определенной длины сверху и снизу обкладывается марлей или канвой и укладывается в глубокие складки, причем между складками устанавливаются гофрированные алюминиевые разделители (рис. 5.10).

Ширина фильтрующей полосы больше ширины разделителей и сетки, что при снаряжении корпуса обеспечивает упругое уплотнение со стенками. При работе воздушный поток движется парал-

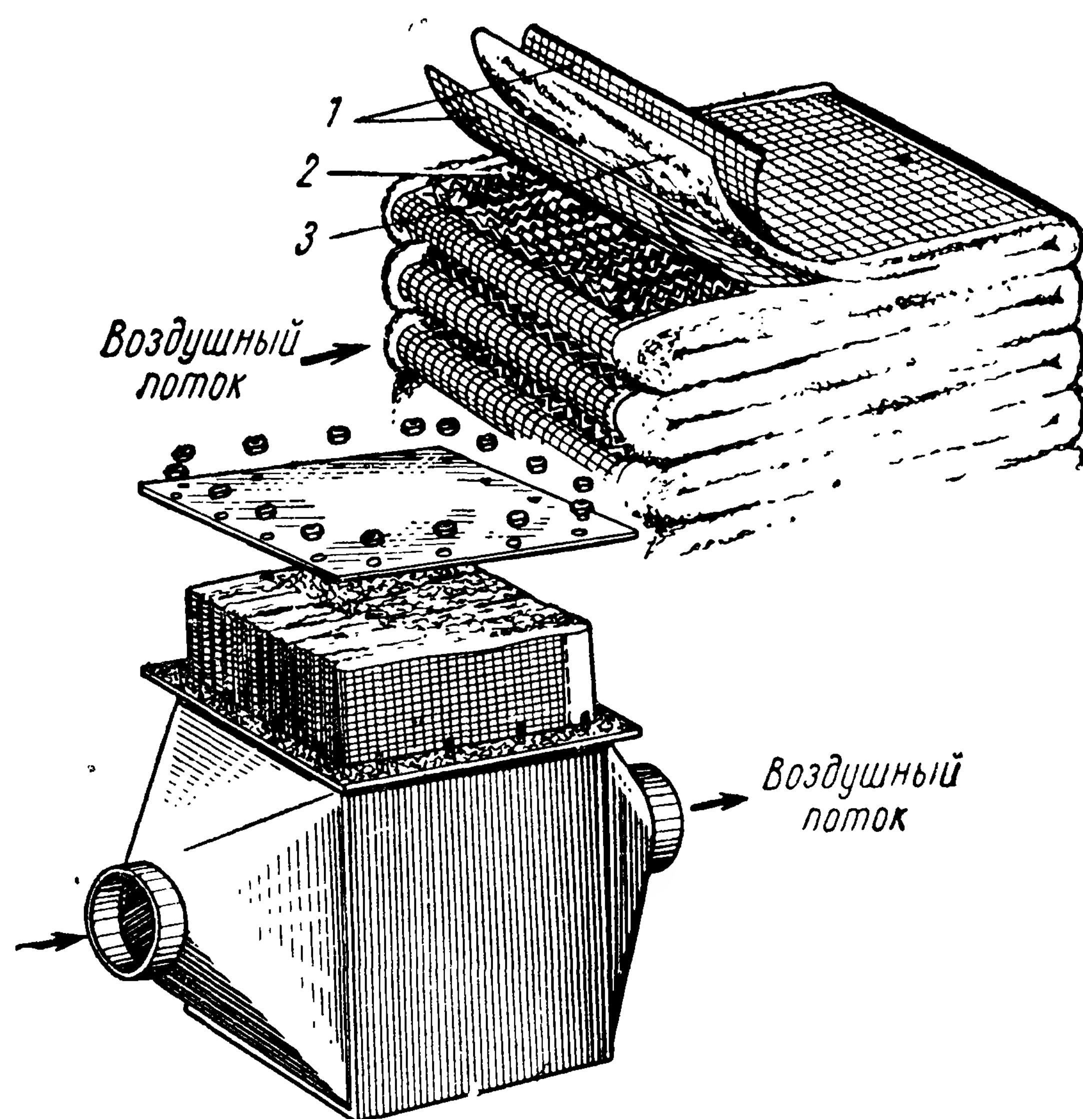


Рис. 5.10. Типичная конструкция асбесто-хлопкового фильтра:

1 — хлопчатобумажная марля; *2* — гофрированные разделители; *3* — материал, состоящий из 50 % хлопка и 50 % асбеста.

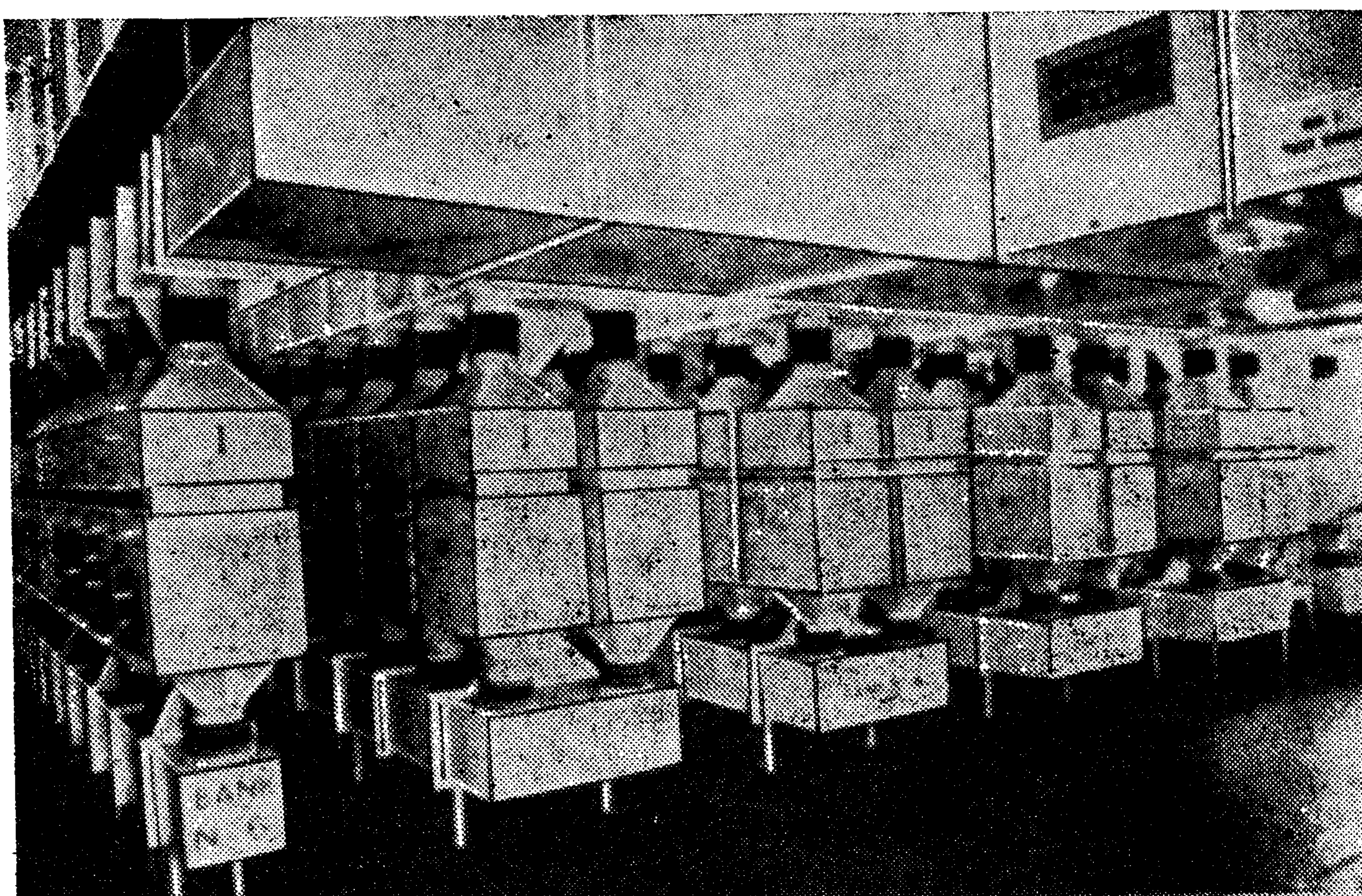


Рис. 5.11. Двухступенчатая фильтрующая установка.

лельно гофрированным разделителям. Как уже отмечалось, применение фильтров такой конструкции приводит к значительному сокращению размеров установки (фильтр производительностью 340 *м*³/*ч* имеет форму куба со сторонами 45 *см*).

Малая высота позволяет установить над ним предфильтр, который значительно увеличивает срок службы фильтрующей среды. На рис. 5.11 показана двухступенчатая установка, состоящая из секций производительностью 340 *м*³/*ч* каждая. В табл. 5.2 приведены размеры и характеристики фильтров этого типа.

Таблица 5.2

Характеристики коробчатых фильтров

Материал	Размеры, *мм*	Диаметр соединительных патрубков, *мм*	Производительность, *м*³/*ч*	Коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой, %	Сопротивление, *мм вод. ст.*
Асбесто-хлопковый	760×460×460	168	340	0,001	31,8
	760×460×460	168	340	0,01	25,4
	760×460×460	168	340	0,1	20,3
	380×250×250	102	68	0,001	31,8
Асбесто-хлопковый с предфильтром	1360×460×460	168	340	0,001	38,1
	1360×460×460	168	340	0,01	31,8
	1360×460×460	168	340	0,1	25,4
Стекловолокно с предфильтром	1360×460×460	168	560	0,35	44,5
Предфильтр	230×460×460	—	340	50,0	6,4

В коробчатых фильтрах с асбесто-хлопковым материалом, как и в цилиндрических фильтрах, наблюдается унос тонких волокон. Такой унос часто нежелателен, и за ними в ряде случаев следует устанавливать дополнительные фильтры.

Бумажные фильтры

Несмотря на значительно меньшие размеры фильтров с асбесто-хлопковым материалом по сравнению с другими типами, они слишком дороги и громоздки для применения во многих технологических процессах, которые требуют высокоэффективной фильтрации газов. Достижения в технологии изготовления бумаг привели к развитию бумажных фильтров, с помощью которых можно в тех же объемах получить значительно большую площадь фильтрации, чем в фильтрах прежних конструкций. Такие бумаги представляют собой в основном смесь тонких и грубых волокон (0,5—2 *мкм*), диспергированных в определенных пропорциях в репульпаторах перед поступлением в бумагоделательную машину. Для повышения механических свойств бумаги в пульпу добавляются связующие смолы. Толщина бумаги 0,2—1,5 *мм*.

В настоящее время фильтры новой конструкции являются относительно недорогими общепринятыми высокоэффективными аппаратами. Изготовители фильтров и бумаги во всем мире оценили преимущества нового фильтрующего материала, и теперь он признан лучшим почти везде. Совершенствование фильтров во многих странах привело к созданию установок с международными стандартными размерами.

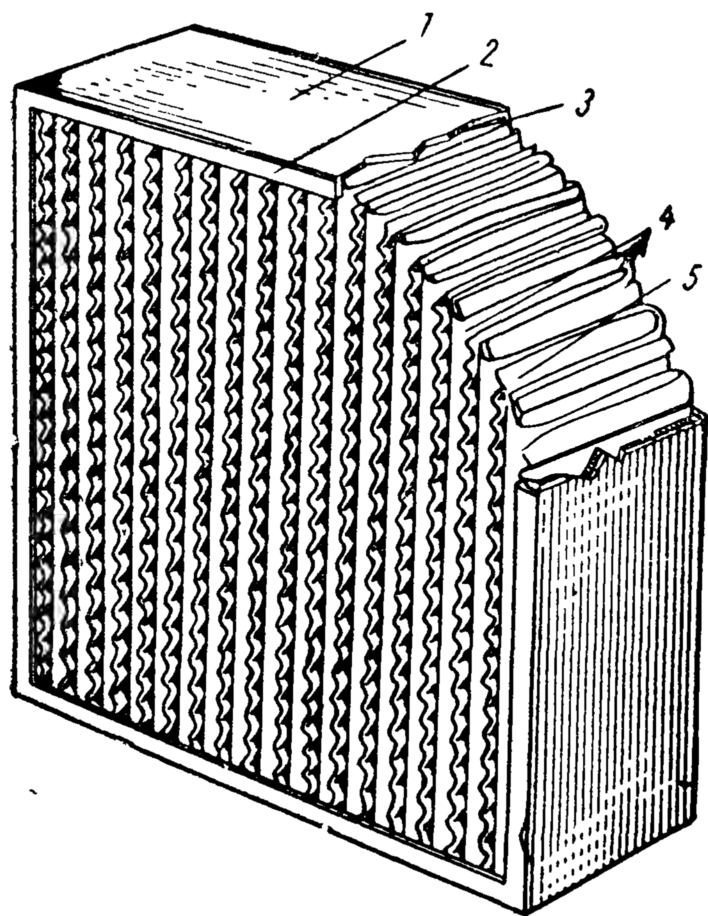


Рис. 5.12. Типичная конструкция высокоэффективного аэрозольного фильтра, снаряжаемого бумажной средой:

1—корпус; 2—резиновое уплотнение; 3—клей; 4—фильтрующая среда; 5—разделители.

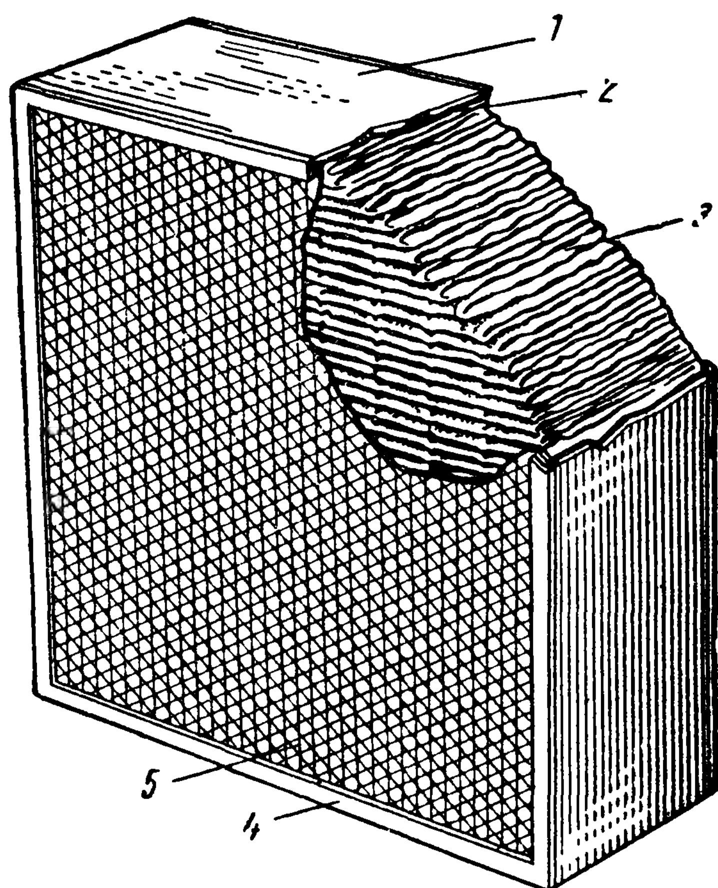


Рис. 5.13. Высокоэффективный аэрозольный фильтр сотового типа:

1—корпус; 2—клей; 3—сотовый фильтрующий элемент; 4—резиновое уплотнение; 5—защитная сетка.

Бумаги имеют более высокое сопротивление и меньшую пылеемкость по сравнению с толстыми расчесанными слоями. Благодаря малой толщине можно получить бо́льшие поверхности фильтрации, размещая бумагу глубокими складками в малых объемах. Может быть получена такая высокая эффективность, как 99,995% по аэрозолю с частицами размером 0,5 *мкм* (при сопротивлении менее 25 *мм вод. ст*).

Все фильтры этого типа содержат длинную полосу фильтрующей бумаги, уложенную складками в прямоугольном корпусе и герметизированную клеем с одной или обеих сторон. Между складками устанавливаются гофрированные разделители, похожие по форме на разделители фильтров с асбесто-хлопковым материалом. В другом случае торцы складок связываются в отдельных перемежающихся точках, и в рабочем состоянии образуется сотовая конструкция. В качестве разделителей применяется шпагат, приклеенный с обеих сторон бумаги по всей длине фильтрующей среды. На рис. 5.12—5.14 показаны описанные типы конструкций.

Для высокоэффективных бумажных фильтров первостепенное значение имеет уплотнение складчатой фильтрующей среды в корпусе. В зависимости от условий эксплуатации выбирается марка клея или связующего. В некоторых фильтрах клей с успехом заменен слоем тонких волокон, в который фильтрующий элемент вдавливается со значительным усилием. При конструировании фильтров такого типа необходимо провести определенные исследовательские

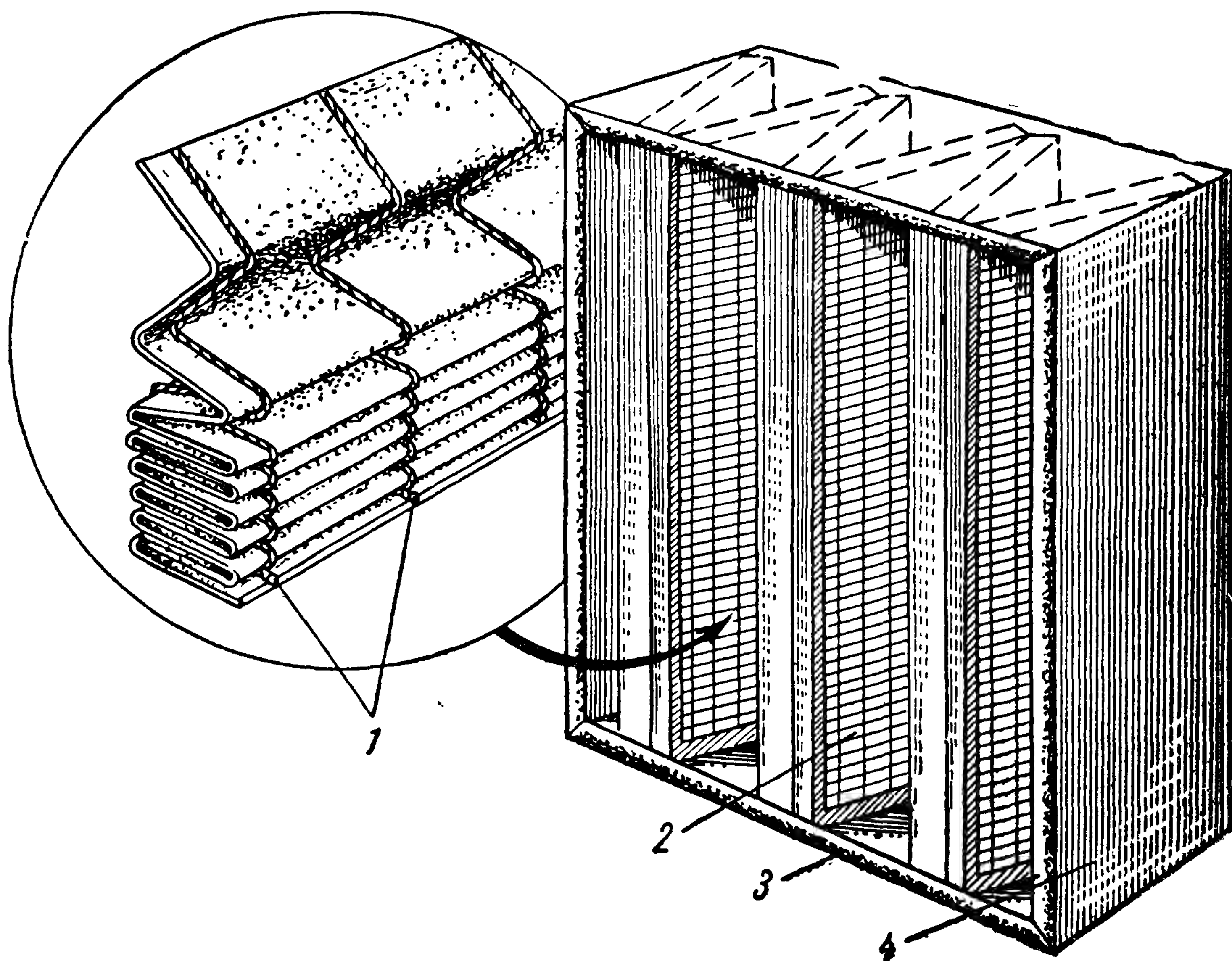


Рис. 5.14. Высокоэффективный аэрозольный фильтр, в котором использован в качестве разделителей шпагат:

1 — шпагат; *2* — *v*-образные фильтрующие панели; *3* — резиновое уплотнение; *4* — корпус.

работы, чтобы удовлетворить требованиям, часто весьма противоречивым. Например, при наличии высокой влажности возникает проблема защиты от воды, которая часто разрешается за счет применения материалов, предварительно обработанных силиконами. При использовании в таких условиях деревянных рамок их необходимо подвергнуть соответствующей обработке, чтобы не допустить коробления и расслаивания, однако обработка не должна препятствовать приклеиванию бумаги к стенкам рамки. Иногда проводится обработка деревянных рам веществами, обеспечивающими их невоспламеняемость в определенных условиях. Такая обработка в любом случае не должна приводить к чрезмерному короблению деревянного корпуса.

Корпуса фильтров для тропических условий следует обрабатывать, чтобы повысить их сопротивляемость росту спор. Наиболее распространенным материалом для корпуса является фанера; вы-

бор сорта и вида материалов и обработка всегда должны проводиться с учетом условий эксплуатации.

Консистенция герметизирующих составов должна обеспечить их легкое проникание во все щели фильтра, чтобы создать надежную герметизацию и закрепить фильтрующий материал в корпусе. Адгезивы и герметизирующие составы не должны быть хрупкими и ломкими при нормальных условиях эксплуатации и должны работать в широком диапазоне температур от —30 до 1000° С. При необходимости составы должны обладать огнестойкостью или химической стойкостью. Естественно, что ни один материал не может удовлетворять всем перечисленным требованиям, поэтому, как мы увидим позднее, используется широкий набор герметизирующих составов и адгезивов.

Материал для разделителей также должен удовлетворять различным требованиям. В некоторых фильтрах устанавливаются предохранительные металлические сетки с лобовой и тыльной сторон. Размеры ячеек сеток должны быть относительно большими, чтобы не получить большого сопротивления и обеспечить визуальный осмотр фильтрующей среды; сетки не являются совершенной защитой, тем не менее они уменьшают возможность повреждения фильтрующей среды при монтаже фильтров.

Применяются в основном четыре типа фильтрующего материала на основе:

1) волокон асбеста и целлюлозы;
2) тонких и ультратонких стеклянных волокон;
3) асбестовых и стеклянных волокон;
4) грубых и тонких керамических волокон.

Первый тип материала используется во многих дешевых стандартных конструкциях при отсутствии высокой температуры, коррозионно-опасных паров или высокой влажности. Однако в последнем случае материал можно обработать силиконом для придания ему гидрофобных свойств. Второй тип материала обычно применяется в тех случаях, когда материал должен обладать огнестойкостью и химической стойкостью, он может эксплуатироваться при температуре до 500° С. Третий тип материала используется для фильтрации горячих газов при температуре до 800° С и четвертый — до температуры 1000° С.

Рабочие характеристики фильтрующих материалов в основном схожи, поэтому установки, работающие при различных условиях, имеют приблизительно одинаковые эффективность и перепад давления. Толщина большинства сортов бумаги была 1,52 *мм*, но новые технологические процессы позволили уменьшить ее до 0,2 *мм* без ухудшения фильтрующих свойств. Это дало возможность существенно снизить стоимость материала, но при выборе марки следует тщательно учитывать эксплуатационные расходы. Уменьшение толщины фильтрующего материала, проводимое с целью обеспечения высокой эффективности, сопровождается увеличением плотности упаковки волокон. Однако осаждение частиц при этом будет про-

исходить преимущественно на поверхности, а не в глубине. Это приведет к тому, что сопротивление более тонкой бумаги достигнет заданной величины быстрей при меньшей запыленности, и, следовательно, уменьшится срок службы фильтра. Поэтому при использовании недорогих воздушных фильтров необходимо учитывать частоту их замены.

Рассматривая более тонкие бумаги, проектировщик должен сравнивать характеристики фильтров по пылевым нагрузкам и давать оценку эксплуатационным затратам до введения новой конструкции. Кроме того, проектировщик должен учесть возможность работы фильтрующей среды с перегрузкой из-за чрезвычайной опасности некоторых производств, где пыль может повредить здоровью персонала при замене фильтра. Поэтому проверяются огнестойкость и коэффициент проскока всех материалов на всех рабочих режимах до внедрения их в промышленность. Краткое описание методов этих испытаний дано в гл. VI. Готовые фильтры необходимо проверять при таких условиях, которые воспроизводят пульсирующий поток, вибрацию, температуру и другие параметры.

Разработано большое количество различных высокоэффективных бумажных фильтров, применяющихся во многих областях. Конструкция всех фильтров одинакова. Ниже приведены некоторые материалы, сгруппированные по их назначению.

Фильтрующая среда. (Общая толщина — от 0,2 до 1,5 *мм* в зависимости от назначения и типа материала).

Целлюлозно-асбестовая Стеклянная Стеклянно-асбестовая Керамическая	все в волокнистой форме превращается в бумагу, обычно со связующими веществами.

Корпус. Фанера (обработанная различными способами для придания огнестойкости, стойкости к химической среде и к воздействию атмосферных осадков).

Сталь.

Армированный пластик.

Алюминий.

Разделители (сепараторы). Пропитанный крафткартон.

Листовой асбест.

Алюминий.

Пластмасса.

Нержавеющая сталь.

Адгезивы. Синтетические на основе каучука.

Эпоксидная смола.

Полистирольная смола.

Высокотемпературные цементы.

Компаунды на основе пластмасс.

Компаунды на основе битумов.

Герметизирующие компаунды. Неопрен (вспученный).

Латексная губка.

Стекло. Керамика.

Здесь приведены не все типы материалов. Во многих случаях материалы подбираются индивидуально в зависимости от условий эксплуатации.

Бумага производится в строгом соответствии со стандартами и поставляется в рулонах. Бумаге придают складчатую форму с помощью специального шаблона. При установке в корпус между складками помещают разделители. Разделители представляют собой прямоугольные гофрированные листы с высотой гофров, обеспечивающей максимальную фильтрующую поверхность в сочетании с минимальным сопротивлением. В некоторых случаях для предохранения бумаги от повреждений на ребра разделителей одеваются *v*-образные полоски ткани.

В табл. 5.3—5.5 приведены рабочие характеристики некоторых бумажных фильтров, дающие возможность оценить области их применения.

Таблица 5.3

Характеристики типичных высокоэффективных бумажных фильтров (см. рис. 5.12)

Тип фильтра	Фильтрующий материал	Материал разделителя	Материал корпуса	Адгезивы	Максимальная температура газов, °C	Максимальная относительная влажность, %
Стандартный (для нормальных условий)	Асбестоцеллюлозный	Бумага	Фанера	Синтетическая смола	120	80
Высокотемпературный	Стеклянная бумага	Алюминий	Сталь	Высокотемпературный цемент	540	100
Химически стойкий	То же	Пластмасса	Армированная пластмасса	Эпоксидная смола	65	100

Таблица 5.4

Стандартные характеристики высокоэффективных бумажных фильтров

Производительность, $м^3/ч$	Размеры, *мм*	Коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой, % в различных типах фильтров		
		стандартный	высокотемпературный	химически стойкий
50	200×200× 84	0,05	0,05	0,05
84	200×200×155	0,05	0,05	0,05
168	300×300×150	0,05	0,01	0,01
340	380×380×220	0,05	0,01	0,01
840	610×610×155	0,05	0,01	0,01
1680	610×610×300	0,05	0,01	0,01

Примечание. Сопротивление всех фильтров 25 *мм вод. ст.*

Таблица 5.5

Фильтры для перчаточных боксов

Тип фильтра	Фильтрующий материал	Материал разделения	Материал корпуса	Размеры, *мм*	Производительность, $м^3/ч$	ΔP, *мм вод. ст.*	Коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой, %
Стандартный огнестойкий	Стеклянная бумага	Алюминий	Сталь	160×160×120	5,0	6,4	<0,002
Химически и огнестойкий	То же	Стеклоткань	Пластмасса	Диаметр 160, длина 116	5,0	6,4	<0,002

Предфильтры

Предфильтры можно сгруппировать в следующие основные типы:

1. Предфильтры прямоугольной формы, составляющие часть основного фильтра (см. рис. 5.2, 5.11 и 5.15). Их эффективность,

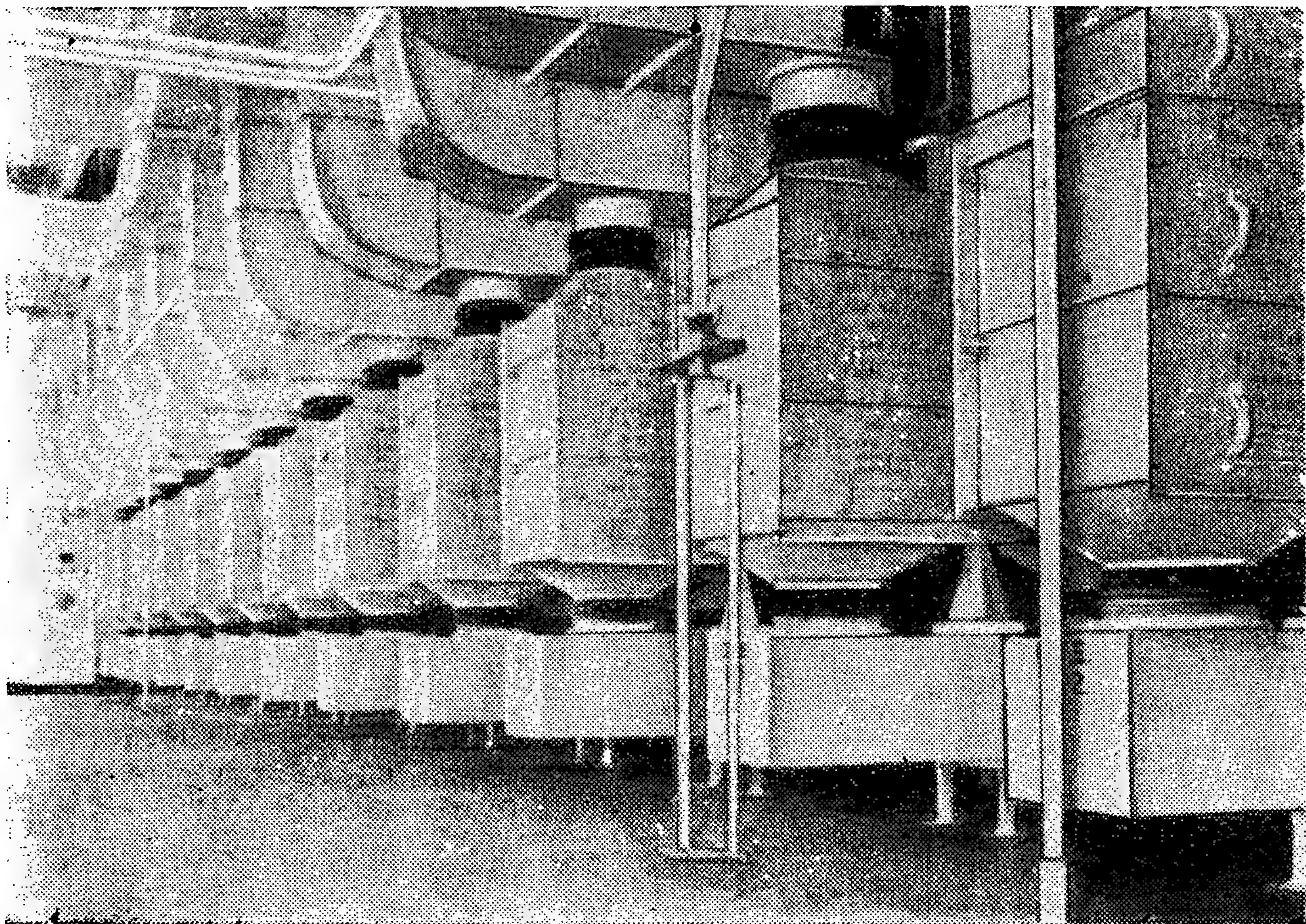


Рис. 5.15. Установка из трехступенчатых фильтров.

средняя в течение всего срока службы, при улавливании субмикронной пыли обычно довольно высока (около 90%). Они применяются в установках, описанных подробно в гл. VIII.

2. Панельные предфильтры (недорогие) с заменяемой средой (рис. 5.16). Их эффективность несколько ниже (70% по субмикрон-

ной пыли). Чаще всего они применяются для очистки приточного воздуха.

3. Автоматические катушечные фильтры с волокнистым материалом.

4. Автоматические фильтры с перемещающимися промасленными сетками. Применяются в помещениях с большой запыленностью. Эти фильтры подробнее описаны в гл. VII.

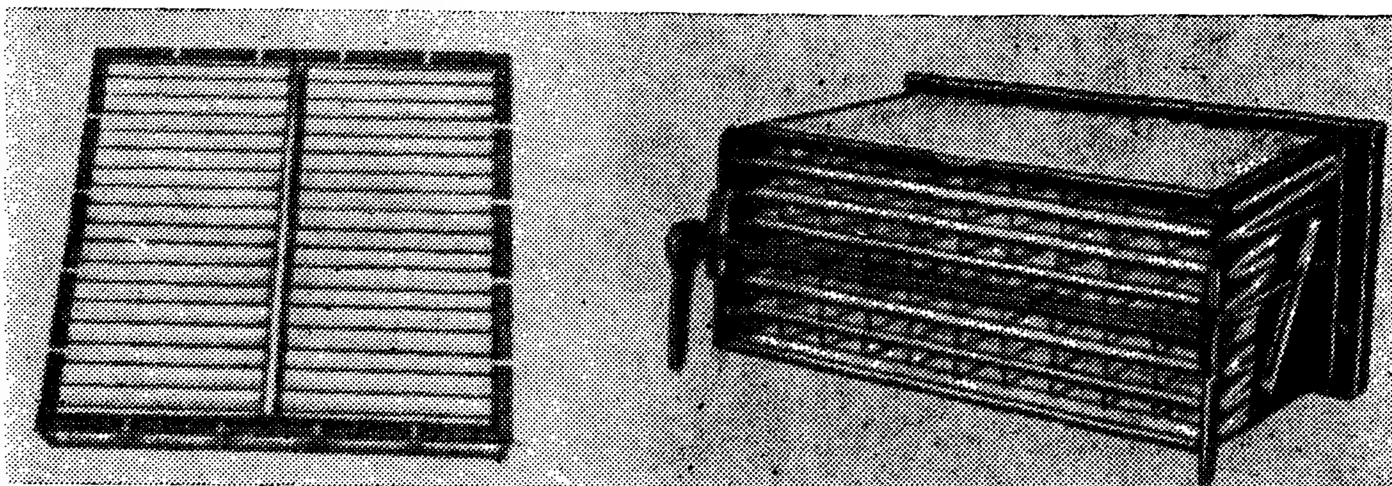


Рис. 5.16. Предфильтр с заменяемой средой.

Конструктивно предфильтры панельного типа представляют собой ячейки или кассеты. Как и автоматические фильтры, их можно компоновать в любом количестве в зависимости от требуемой производительности.

К последним трем типам относятся также и фильтры, нашедшие применение в системах кондиционирования и вентиляции.

МОНТАЖ ФИЛЬТРОВ

При выпуске с завода все высокоэффективные фильтры тщательно проверяются. Если фильтр не поврежден при транспортировке можно быть уверенным, что его рабочие характеристики после монтажа будут соответствовать установленным стандартам. После перевозки фильтр обязательно проверяют на отсутствие повреждений фильтрующей среды. В некоторых случаях непосредственно перед монтажом фильтров производится контроль с помощью специального оборудования. Это особенно желательно в тех случаях, когда повышенные выбросы в атмосферу очень опасны.

Однако, несмотря на такие предосторожности, отмечаются случаи неудовлетворительной работы фильтров. Причиной этого может быть неправильный монтаж в сочетании с нарушением стандартов при проектировании. Характеристики фильтра серьезно ухудшаются, если не предусмотрены меры по предотвращению утечки запыленных газов через неплотности.

Коробчатые фильтры с асбесто-хлопковым материалом и фильтры с цилиндрическим корпусом поставляются в готовом виде, вместе с верхним и нижним коллекторами или в виде отдельных фильтрующих элементов с системами соединения и уплотнения элементов

с коллекторами. Несмотря на то что каждый элемент и готовые фильтры проверяются на герметичность при выпуске с завода, аналогичная проверка проводится после монтажа установки до пуска ее в эксплуатацию. Обычно систему проверяют на герметичность под давлением 25—50 *мм вод. ст.* с контролем мест соединений мыльной пеной. При необходимости проводятся более тщательные и длительные испытания фильтров. Например, ограничивают подсос воздуха не более 0,05% объемной производительности за 1 *ч*.

Бумажные фильтры, как и фильтры других типов, снаряжаются в стандартных цилиндрических корпусах, и конструкция каждого

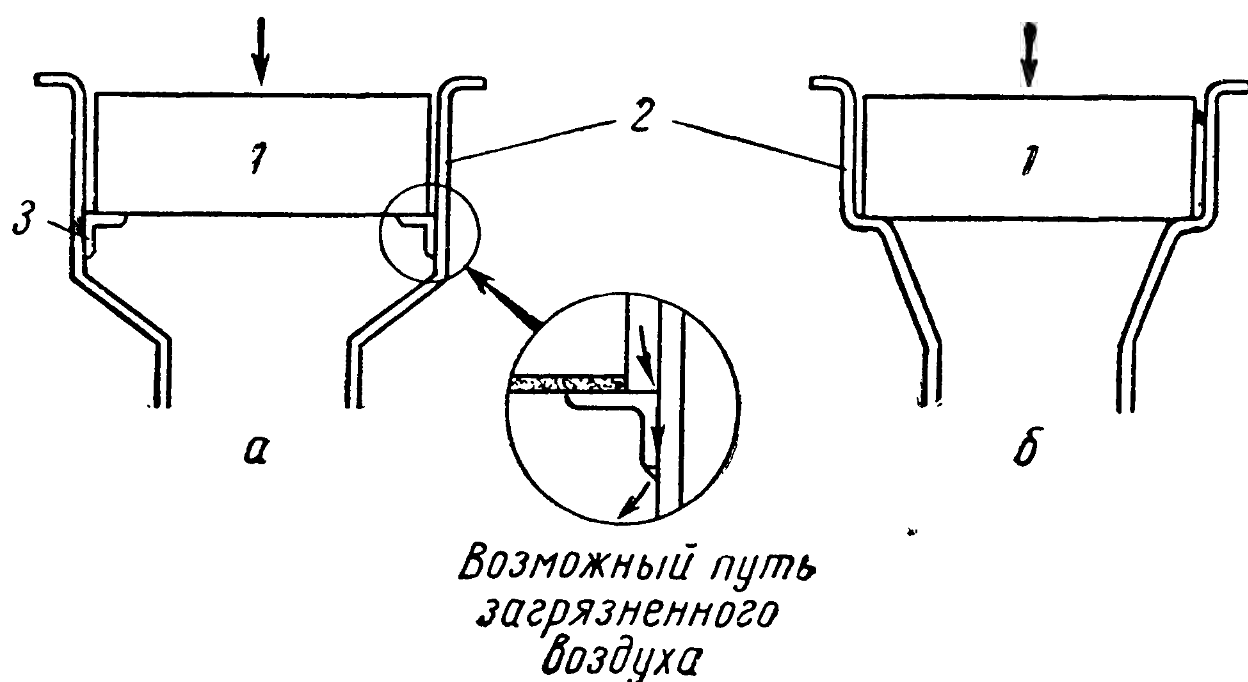


Рис. 5.17. Неудачная (*а*) и правильная (*б*) конструкции корпуса фильтра:

1 — фильтр; *2* — корпус; *3* — опорный уголок.

корпуса должна строго соответствовать установленным нормам. На рис. 5.15 показана крупная установка, состоящая из трехступенчатых фильтров, в которых использованы два типа бумажных фильтрующих элементов в сочетании с предфильтрами. Размеры установки позволяют оценить подсосы, которые невелики для каждой секции, но для установки в целом могут быть довольно значительными. При проектировании корпусов необходимо принимать меры для уменьшения подсосов.

Рассмотрим типичный пример. Требуется расположить фильтр горизонтально при нисходящем потоке воздуха и осуществить уплотнение по внутреннему выступу корпуса. Два решения (правильное и неверное) показаны на рис. 5.17. Хотя первый вариант представляется наиболее логичным, неудачная конструкция встречается еще слишком часто.

Конструкция смотровых люков и фланцев на корпусе фильтра также может быть неудовлетворительной (рис. 5.18).

Вероятно, причина таких конструктивных недостатков заключается в том, что повышенные требования к конструкции вовсе не являются необходимыми для обычных систем кондиционирования воздуха. Эффективное улавливание предполагает более точную оценку требований фильтрации при проектировании, и, вероятно,

такие фильтры будут отлично работать в обычных вентиляционных системах. Вот некоторые из основных требований.

1. По возможности фильтр в корпусе следует устанавливать так, чтобы воздушный поток прижимал фильтр к уплотнению. Если это невозможно, необходимо принять соответствующие меры, чтобы обеспечить надежное уплотнение.

2. При горизонтальном расположении фильтра воздушный поток следует направлять сверху вниз, чтобы осадок пыли оставался внутри установки и не перемещался при обслуживании.

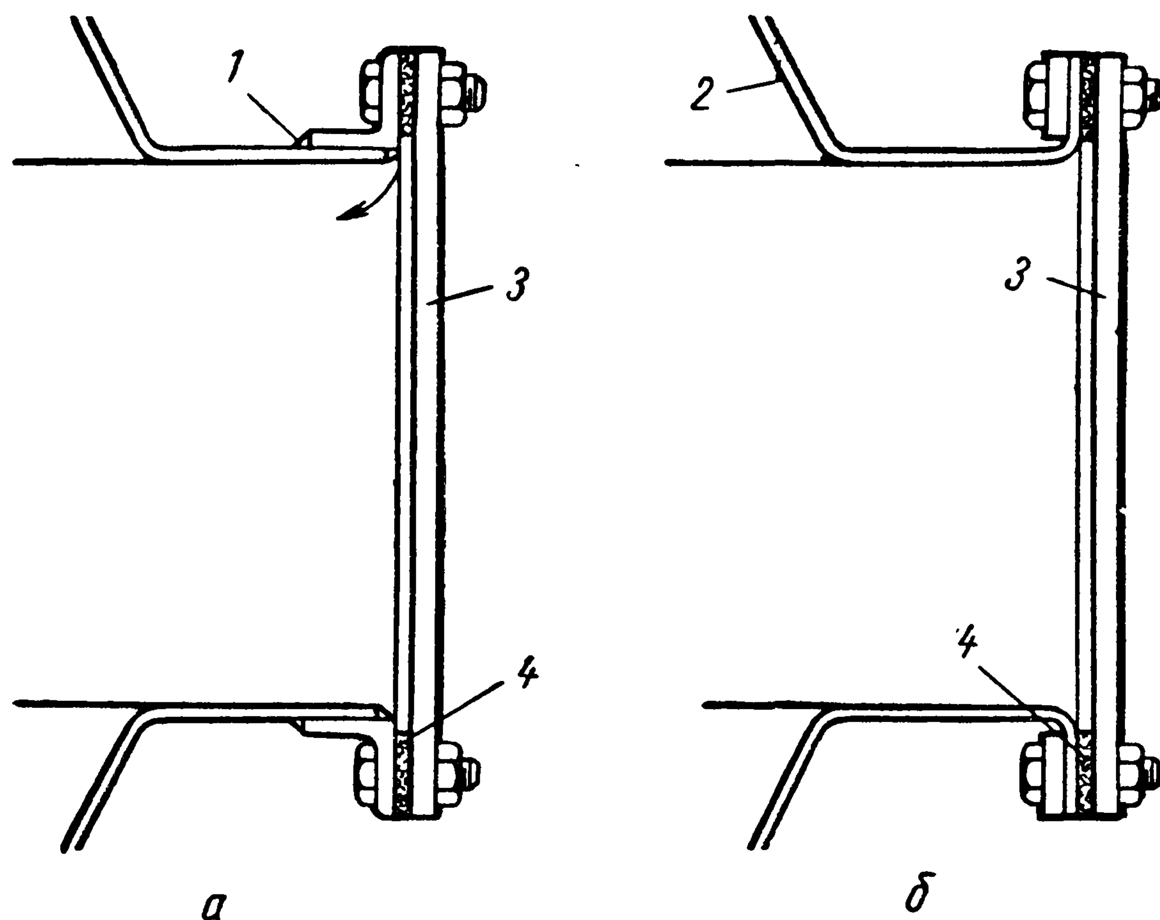


Рис. 5.18. Неудачная (*а*) и правильная (*б*) конструкции фланцев смотровых люков:

1 — возможные места подсоса воздуха; *2* — корпус фильтра; *3* — люки для осмотра; *4* — уплотняющие прокладки.

3. Корпус должен иметь как можно меньше «карманов», в которых могла бы скапливаться пыль.

4. Корпус должен иметь скругленные углы. Все внутренние сварные швы тщательно зачищаются, в особенности на поверхностях уплотнения.

5. К корпусу фильтра должен быть обеспечен свободный доступ со всех сторон. Следует помнить, что при фильтрации газов, содержащих токсичную пыль, слишком тесное расположение фильтров может вызвать несчастный случай.

Все это в основном относится к фильтрам в корпусах, но многие требования можно отнести и к бескорпусным конструкциям. Установка высокоэффективных бумажных фильтров в вертикальных участках воздуховодов приточной вентиляции обходится не очень дорого. В таких случаях в комплекте с фильтром поставляют многоярусный каркас, который иногда выпускается отдельно. Все сварные швы на поверхностях уплотнения каркаса должны быть зачищены заподлицо; периферийные участки промазываются мастикой или аналогичным составом. При проектировании крупных фильтров

следует учитывать, что их начальное сопротивление составляет порядка 25 *мм вод. ст.* и во время работы возникают значительные нагрузки на каркас. Каркас должен быть достаточно жестким и не допускать разгерметизации по уплотняющим поверхностям. При монтаже складки располагаются вертикально, чтобы устранить их провисание под собственным весом. Типичный многосекционный фильтр показан на рис. 9.8.

При проектировании фильтров для систем кондиционирования воздуха основное внимание следует обращать на монтаж фильтра,

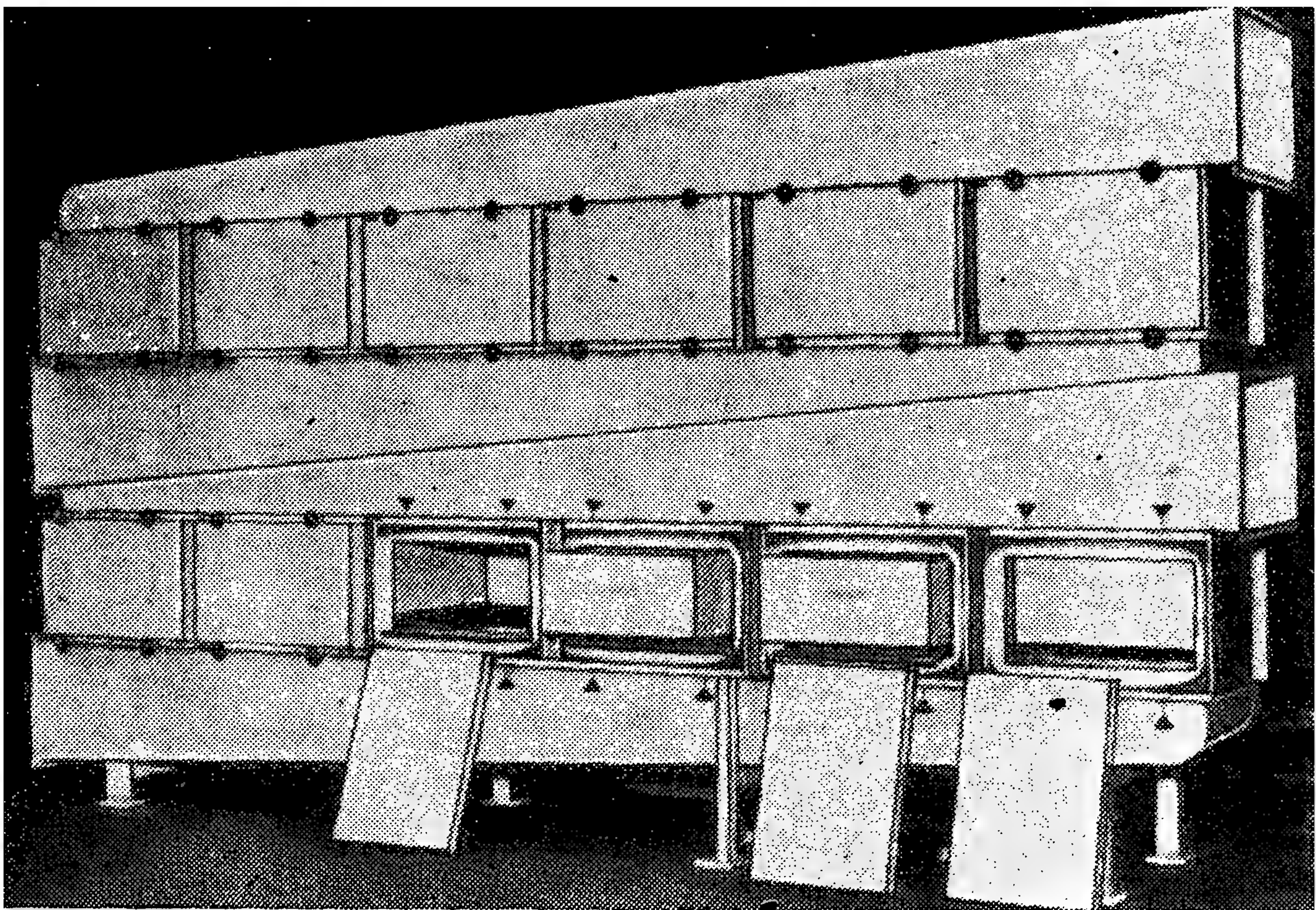


Рис. 5.19. Компактная конструкция фильтров и коллекторов.

чтобы не допустить попадания неочищенного воздуха в помещения. При размещении вентилятора за фильтром следует принять меры для предотвращения попадания загрязнений в нагнетательную систему за счет подсоса неочищенного воздуха через зазор между валом и кожухом вентилятора. Недавно в установках такого типа стали располагать вентилятор до фильтра. Однако при наличии опасных и бактериологических пылей лучше устанавливать вентилятор за фильтром, чтобы предотвратить образование наростов на лопастях.

Рабочие характеристики высокоэффективных фильтров при изменении скорости воздушного потока меняются незначительно и относительно плохое воздухораспределение не имеет существенного значения. Это дает возможность подходить дифференцированно к конструкции корпусов и входных коллекторов для менее эффективных фильтров с малым сопротивлением. На рис. 5.19 показана крупная батарея фильтров тонкой очистки, установленных в непосредственной близости от коллекторов, где происходят резкие изменения направления воздушного потока.

Смена фильтров

Сопротивление фильтра обычно определяет срок его службы. Система вентиляции и тип вентилятора обусловливают максимально допустимое сопротивление фильтра, при котором поддерживается необходимая производительность. Обычно сопротивление принимается равным 50—200 *мм вод. ст.*

Существуют и другие факторы, определяющие необходимость замены фильтра:

1. Чрезмерное скопление в фильтре волокнистой пыли или горючего материала.

2. Высокий уровень радиоактивности материалов, скопившихся в фильтре.

3. Снижение эффективности, что определяется постоянным контролем воздуха за фильтром. Контроль воздуха особенно важен при улавливании радиоактивных и высокотоксичных пылей или инфекционных бактерий.

4. Уменьшение сопротивления из-за повреждения или разрыва бумаги, неправильного монтажа и т. д.

При проектировании необходимо знать, будет заменяться только фильтрующая среда или среда вместе с корпусом фильтра. Например, при улавливании радиоактивных и токсичных веществ фильтр обычно заменяется целиком, хотя в некоторых случаях допустима замена только фильтрующей среды (см. гл. IX).

Полная замена фильтра экономически выгоднее, например, при улавливании бактериальных организмов. Фильтры с цилиндрическим корпусом обычно стерилизуются и направляются на заводы-изготовители, где они вновь снаряжаются по обычной методике.

Использование полностью заменяемых фильтров может также определяться допускаемой величиной подсосов при эксплуатации. Ясно, что возможность увеличения подсосов в крупной установке, где заменяется только фильтрующая среда, намного больше, чем при замене целиком сварных конструкций. К тому же в первом случае конструкция фильтра усложняется, так как труднее обеспечить герметичность.

Упаковка фильтров

Высокоэффективные бумажные фильтры должны тщательно упаковываться. Обычно для этого используют коробки из прочного картона с дополнительными внутренними прокладками для предохранения лобовых поверхностей фильтра от повреждений при транспортировке и распаковке.

Для предотвращения провисания складок фильтр в коробке устанавливается так, что складки расположены вертикально. При горизонтальном расположении складок фильтрующая среда может отклеиваться во время транспортировки. Тончайшие трещины на

фильтрующей среде могут означать, что фильтр транспортировался в горизонтальном положении.

На наружной стороне коробок обычно делают надписи «верх», «обращаться с осторожностью», наносят вертикальную стрелку.

Осмотр и испытания фильтров

При получении партии фильтров перед распаковкой необходимо провести наружный осмотр коробок, проверить правильность положения фильтра при транспортировке. Поврежденные коробки следует осматривать особенно тщательно.

Фильтр осторожно извлекают из коробки; рекомендуется вначале открыть и отогнуть верхние створки коробки, перевернуть ее и затем поднять. Если фильтр вытаскивать из коробки за верхний открытый торец корпуса, то можно повредить фильтрующую среду и полностью вывести фильтр из строя. Возможность повреждения среды уменьшается при наличии перфорированных экранов на лобовых поверхностях фильтра.

Визуальный осмотр фильтра для определения целостности фильтрующей среды можно провести при помощи лампы, чтобы установить, нет ли разрывов, трещин или сквозных отверстий в среде или клее. Визуальный осмотр не заменяет испытаний по аэрозолю метиленовой голубой или методом пламенной фотометрии, а лишь помогает определить очевидные недостатки.

Следует также проверить герметичность фильтра в углах корпуса и периферийное уплотнение, которое обычно изготовляется из отдельных полос и приклеивается для обеспечения герметичности соприкасающихся поверхностей. Фильтры, поступающие в поврежденной упаковке, следует тщательно проверять, так как кроме упомянутых повреждений могут быть расплющены кромки гофрированных разделителей. Это, правда, не означает, что повреждена фильтрующая среда, но если есть какое-то сомнение, необходимо проверить фильтр по аэрозолю метиленовой голубой или методом пламенной фотометрии. Если кромки прокладок сильно деформированы, то это может привести к увеличению сопротивления фильтра и сокращению срока службы.

Не следует ремонтировать поврежденный фильтр и в особенности фильтрующую среду в условиях эксплуатации.

Обычно на корпусе фильтрующей установки указаны фирма-изготовитель, номер серии, производительность и коэффициент проскока. Если имеется какое-то сомнение относительно характеристик поврежденных фильтров, необходимо провести повторные испытания. Это предотвратит несчастные случаи, возникающие из-за небрежной приемки и эксплуатации.

Хранение фильтров

Проверенные фильтры с соблюдением всех предосторожностей вновь упаковываются в коробки и хранятся в сухом месте. Коробки устанавливаются по высоте не более, чем в четыре ряда, в особен-

ности высокотемпературные фильтры со стальными корпусами. Коробки хранятся в складе в соответствии с инструкциями; они не должны смешиваться с другими деталями, которые могут повредить упаковку.

Разгрузка и погрузка

Для погрузки и разгрузки прочных картонных коробок можно использовать стандартное складское оборудование; автопогрузчик является идеальным механизмом для укладки фильтров в штабели. Поднимают картонные коробки за помеченные углы. Если при погрузке или разгрузке фильтр упадет, его необходимо подвергнуть повторному осмотру и испытаниям, как и фильтры с поврежденной упаковкой.

При погрузке фильтр можно зажимать только по наружной поверхности корпуса, если нет скоб. Даже легкий контакт штифтов с фильтрующим материалом почти в любой точке внутри упаковки может привести к его проколу. Опасность повреждения среды уменьшается, если фильтры снабжены предохранительными решетками.

Если скоб нет, как это бывает у фильтров с деревянными корпусами, необходимо на месте сделать устройства для захвата фильтра.

Глава VI

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ФИЛЬТРЫ И МЕТОДЫ ИХ ИСПЫТАНИЯ

Волокнистые фильтры, предназначенные для высокоэффективного улавливания субмикронных частиц, должны подвергаться необходимым испытаниям. Четко сформулированные требования, в соответствии с которыми они изготовляются, должны строго выполняться. Особенно в атомной, фармацевтической и микробиологической промышленностях они должны гарантировать определенные рабочие характеристики, в первую очередь в отношении эффективности фильтрации, сопротивления и пылеемкости.

Сразу же после разработки таких фильтров стало очевидным, что кроме визуального осмотра каждого изготовленного образца и проведения некоторых простых испытаний необходимо давать быструю и относительно легкую контрольную оценку каждого фильтра. Необходимо также решить, до какой степени фильтр должен подвергаться оценочным испытаниям без снижения его эксплуатационных характеристик для последующей работы.

Прежде чем переходить к подробному описанию испытаний и технических требований, необходимо сформулировать общие требования к таким фильтрам.

1. Они должны улавливать тонкодисперсные частицы, основная масса которых имеет размеры в субмикронной области, с определенной эффективностью в каждом конкретном случае.

2. Они должны иметь низкое сопротивление, соответствующее требуемой эффективности.

3. Пылеемкость фильтров должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить непрерывную работу установки без особого наблюдения в течение приемлемого периода времени. Это особенно важно при фильтрации токсичных пылей.

4. Материалы, используемые для снаряжения фильтров, должны быть устойчивыми в химическом, механическом и физическом отношениях в расчете на экстремальные условия эксплуатации, которые вполне возможны при реальном применении фильтров.

5. Конструкционные материалы должны выдерживать значительные перепады давления. Это особенно важно при наличии высокой влажности, так как в этих условиях сопротивление фильтрующего материала может резко возрастать.

6. Фильтры должны быть достаточно прочными, чтобы противостоять механическим нагрузкам и ударам при транспортировке, монтаже и эксплуатации.

С точки зрения экономичности высокоэффективные аэрозольные фильтры подразделяются на следующие типы, которые используются в соответствии со спецификой работы.

Фильтры для работы в нормальных окружающих условиях. Обычно применяемые фильтрующие среды являются горючими. Все материалы для этих фильтров выбираются с учетом их экономичности и (иногда) выдвигаемых специальных требований по обязательному уничтожению (сожжению) фильтра. Целлюлозно-асбестовая бумага особенно часто используется в этом типе фильтров; она должна выдерживать перепады давления до 150 *мм вод. ст.* при 80%-ной относительной влажности.

Высокотемпературные фильтры. Бумага из стекловолокна является в этом случае наиболее широко используемой фильтрующей средой, предельно допустимая рабочая температура которой обусловливается температурой точки плавления стекла (600—650 °С). Предельная температура их применения обычно составляет 500° С. Все конструкционные материалы фильтра должны выдерживать эти пределы и работать при 80%-ной относительной влажности.

Химически стойкие фильтры. Устойчивые в химически агрессивной среде фильтры должны отвечать требованиям, относящимся к фильтрам для нормальных окружающих условий, а также противостоять воздействию слабых кислот, щелочей и паров органических растворителей. При выборе фильтров этого типа всегда следует тщательно учитывать все ограничения, чтобы во время эксплуатации не могла создаться ситуация, при которой в фильтре может произойти конденсация химически агрессивных веществ. Это выведет фильтр из строя.

При учете воздействия органических растворителей необходимо иметь в виду, что при непрерывном прохождении воздуха или газа через фильтр скорость поглощения паров растворителей фильтром больше, чем скорость равновесного поглощения веществ в стационарных условиях. Концентрация паров растворителей, воздействующая на синтетические материалы (200 *мг/л*), обычно существенно больше концентрации, допустимой официальными нормами, исходя из обеспечения взрывобезопасности. Это очень важно учитывать при обсуждении равноценности испытаний, применяемых для фильтров.

Для удовлетворения специфическим требованиям все три типа фильтров получают специальное исполнение: одни фильтры способны противостоять росту грибков и бактерий в условиях очень высокой влажности (тропические условия); другие обладают сверх-

высокой эффективностью (фильтры для перчаточных боксов); третьи выдерживают очень высокие температуры (до 1 000° С).

Фильтры последнего типа были выпущены в очень ограниченных количествах в США, однако чрезвычайно высокая стоимость препятствует их широкому применению. В настоящее время проводятся исследования фильтрующих сред и конструкционных материалов с целью увеличения температурного предела при меньшей стоимости.

КОНТРОЛЬНЫЕ И ТИПОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Для проверки продукции в технологических линиях изготовления фильтров, а также для контроля фильтров при освидетельствовании новых установок должна проводиться целая система простых, но строгих согласованных и обязательных методов испытаний всех фильтров без ущерба для их последующей эксплуатации.

Следовательно, для измерения степени улавливания субмикронных частиц неприменима контрольная оценка по методу потемнения с использованием пыли, содержащей частицы в широкой области размеров, так как это могло бы привести к преждевременному забиванию фильтра и сокращению продолжительности его эксплуатации. Однако контрольная оценка по аэрозолю метиленовой голубой или с помощью пламенной фотометрии по аэрозолю хлористого натрия вполне подходит для этих целей.

В тех случаях, когда необходима более полная информация, например при разработке новых образцов фильтров, успешно применяются типовые испытания. Эти испытания могут сопровождаться разрушением образца, иногда снижением его качества или сокращением сроков его службы или составляющих элементов фильтров.

ИСПЫТАНИЯ ФИЛЬТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Испытания по степени потемнения

В этом виде испытаний эффективность очистки фильтров оценивается величиной, равной отношению объемов воздуха, требуемых для получения на пробоотборной бумаге одинаковых по цвету пятен на входе и выходе из фильтра.

Существуют различные методики, но в основных чертах они аналогичны. Обычно используется окружающий воздух, не подвергающийся предварительной очистке перед этим фильтром от атмосферных загрязнений.

Методика испытаний по аэрозолю метиленовой голубой

Эта методика вначале была разработана в военной лаборатории химической защиты (г. Портон) для оценки противодымных фильтров в противогазах и фильтрах-поглотителях для убежищ.

Позднее Британское бюро стандартов распространило эту методику испытаний на фильтры, применяемые в системах кондиционирования и общей вентиляции, и утвердило соответствующие приборы.

Испытания проводят путем распыления 1%-ного раствора красителя метиленовой голубой в дистиллированной воде. При прохождении через газоходы капельки испаряются, образуют сухой аэрозоль из частиц метиленовой голубой, размеры которых колеблются в пределах от 0,01 до 1,5 *мкм*, медианный весовой размер частиц составляет 0,5—0,6 *мкм*. Эффективность фильтра определяют так: берут отдельные пробы воздуха на входе и на выходе, пропуская их через отдельные пробоотборные фильтры диаметром 12,5 *мм*, а затем проявляют их, пропаривая фильтры до появления сплошного голубого окрашивания. Объемы отобранного для проб воздуха на входе и на выходе подбирают таким образом, чтобы окрашивание имело одинаковую интенсивность; величину проскока метиленовой голубой рассчитывают по отношению известных объемов отфильтрованного и неотфильтрованного воздуха. Практически серии проб на входе отбирают с помощью калиброванного ручного насоса, отсасывая 5, 10, 15, 20 и 25 $см^3$ воздуха. Пятна сравниваются с теми, которые были получены после фильтров.

Предположим, что после фильтра проводится отсос в течение 2 *мин* со скоростью 10 *л/мин*. Общий объем отобранного воздуха, из которого осаждены частицы красителя, составит 20 000 $см^3$. Полученное окрашивание сравнивают с пробой из поступающего воздуха, наиболее близко подходящей к пробе на выходе, и подсчитывают коэффициент проскока. Для нашего примера проба на входе в 10 $см^3$ наиболее близко подходит к пробе на выходе в 20 000 $см^3$. Отсюда следует, что содержание красителя в очищенном воздухе составляет 10/20 000 входящего воздуха. Следовательно, коэффициент проскока испытуемого образца по метиленовой голубой будет $10 \times 100/20\,000 = 0{,}05\%$.

Методика испытаний по пламенной натриевой фотометрии

Несмотря на то что в Великобритании уже в течение многих лет методика испытаний по аэрозолю метиленовой голубой считается стандартной, ее необходимо заменить методом пламенной натриевой фотометрии с электронным контролем. Этот метод был впервые разработан в военной лаборатории химической защиты (г. Портон). Его преимущество состоит в точном и моментальном определении коэффициента проскока. Метод особенно подходит для количественного контроля выпускаемой продукции и весьма полезен при разработке и исследовании фильтрующих материалов [1] (рис. 6.1).

Аэрозоль из капелек жидкости, полученный распылением 2%-ного раствора поваренной соли в дистиллированной воде, пропускается через газоходы длиной до 9 *м*, в которых влага испаряется, при этом образуется сухой аэрозоль из твердых частиц куби-

ческой формы размером от 0,01 до 1,7 *мкм* (медианный весовой размер 0,6 *мкм*). На рис. 6.2 приведена электронно-микроскопическая

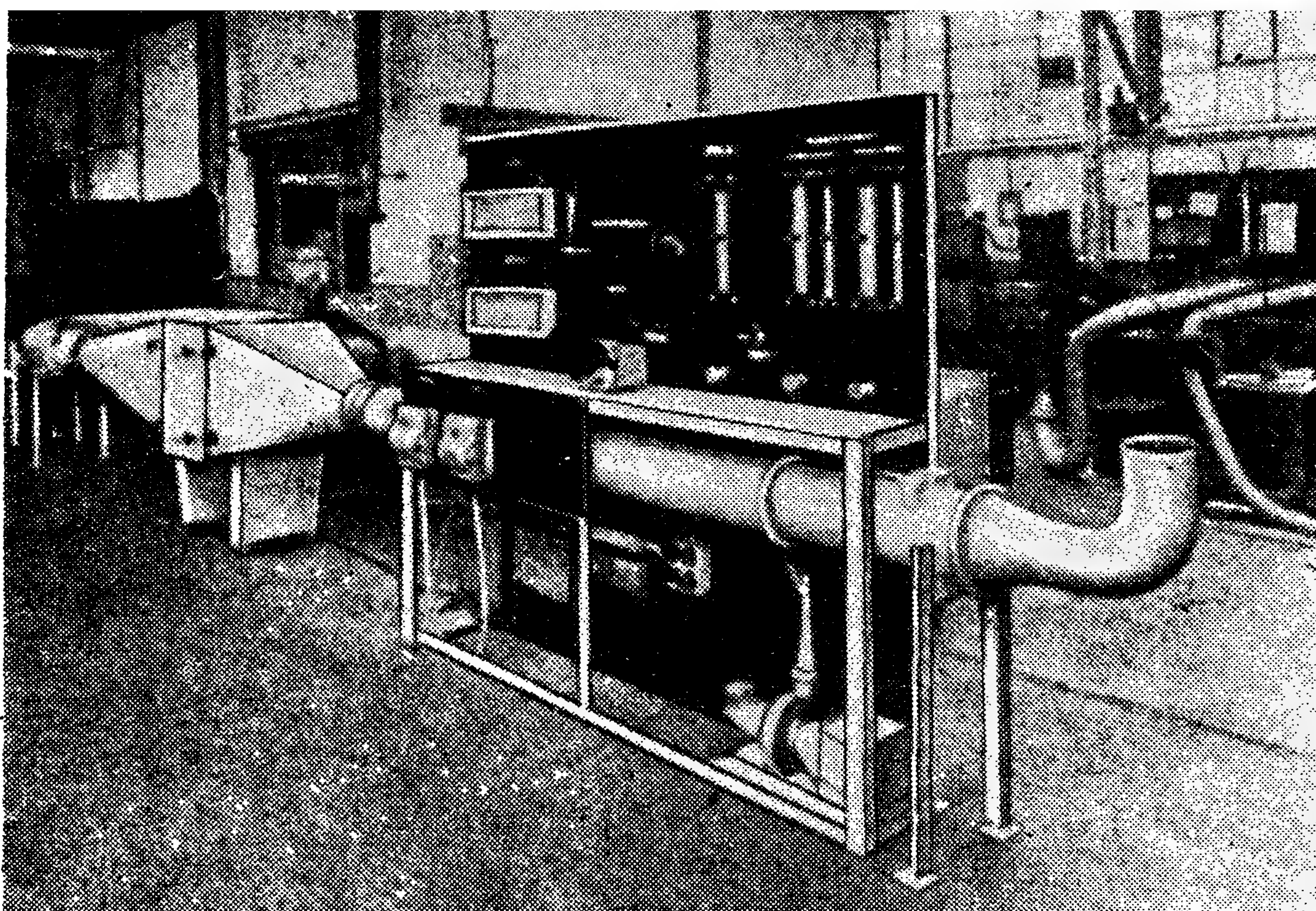


Рис. 6.1. Стенд для испытания фильтров по аэрозолю хлористого натрия.

фотография солевых частиц аэрозоля, показывающая распределение частиц по размерам. Влажность воздуха в газоходах контролируется гигрометрами, калорифер используется только в том случае, если необходимо поддерживать относительную влажность ниже 55%. Сухой аэрозоль поступает в воздушный поток через смеситель с перегородками, который обеспечивает хорошее перемешивание непосредственно перед поступлением в испытуемый фильтр. В воздушный поток, пропускаемый через фильтр, вводится определенная доля аэрозольного потока, величина которого зависит от эффективности аппарата. Производительность фильтра контролируется диафрагмой с манометром.

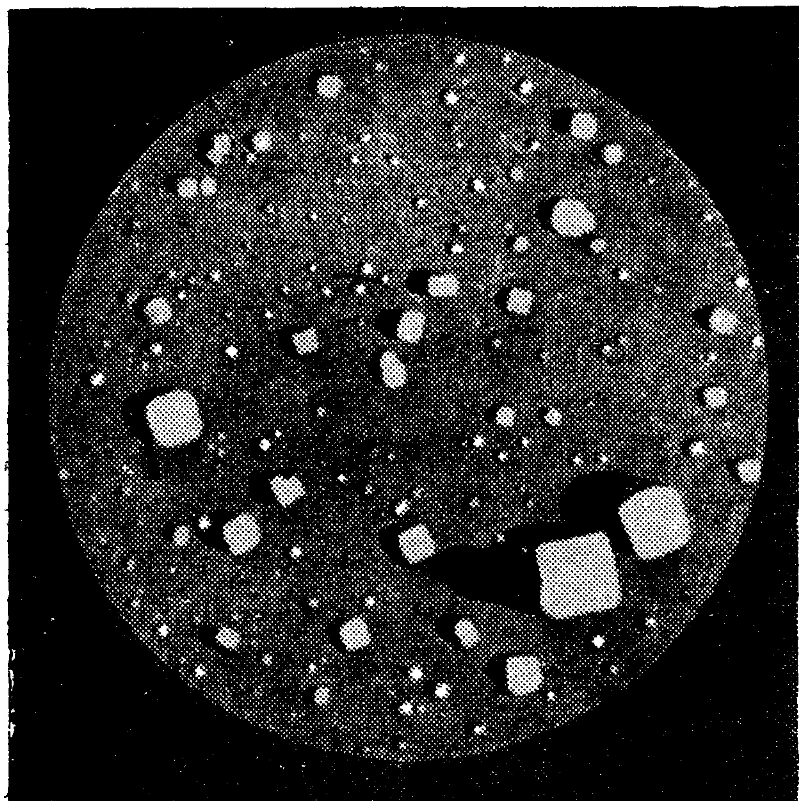


Рис. 6.2. Частицы хлористого натрия.

Воздух, отбираемый для контроля со скоростью 30 *л/мин* из газоходов до и после испытуемого фильтра, направляется в фотометр. Этот воздух поступает внутрь пробоотборной трубы фото-

метра и часть его, захватываемая конвекционными токами, создаваемыми водородной горелкой (водород выпускается под давлением 100 *мм вод. ст*), попадает в водородное пламя. Степень пожелтения света, происходящего вследствие наличия в пламени натриевых солей, прямо пропорциональна массе присутствующей соли. Желтый свет от натриевого пламени проходит через линзы, а затем через интерференционный натриевый фильтр и фильтр нейтральной плотности и падает на экран трубки фотоэлектронного умножителя.

Фотоэлектронный умножитель является сенсибилизированной фотоэлектронной трубкой; интерференционный натриевый фильтр пропускает только свет с длиной волны натрия, а нейтральный

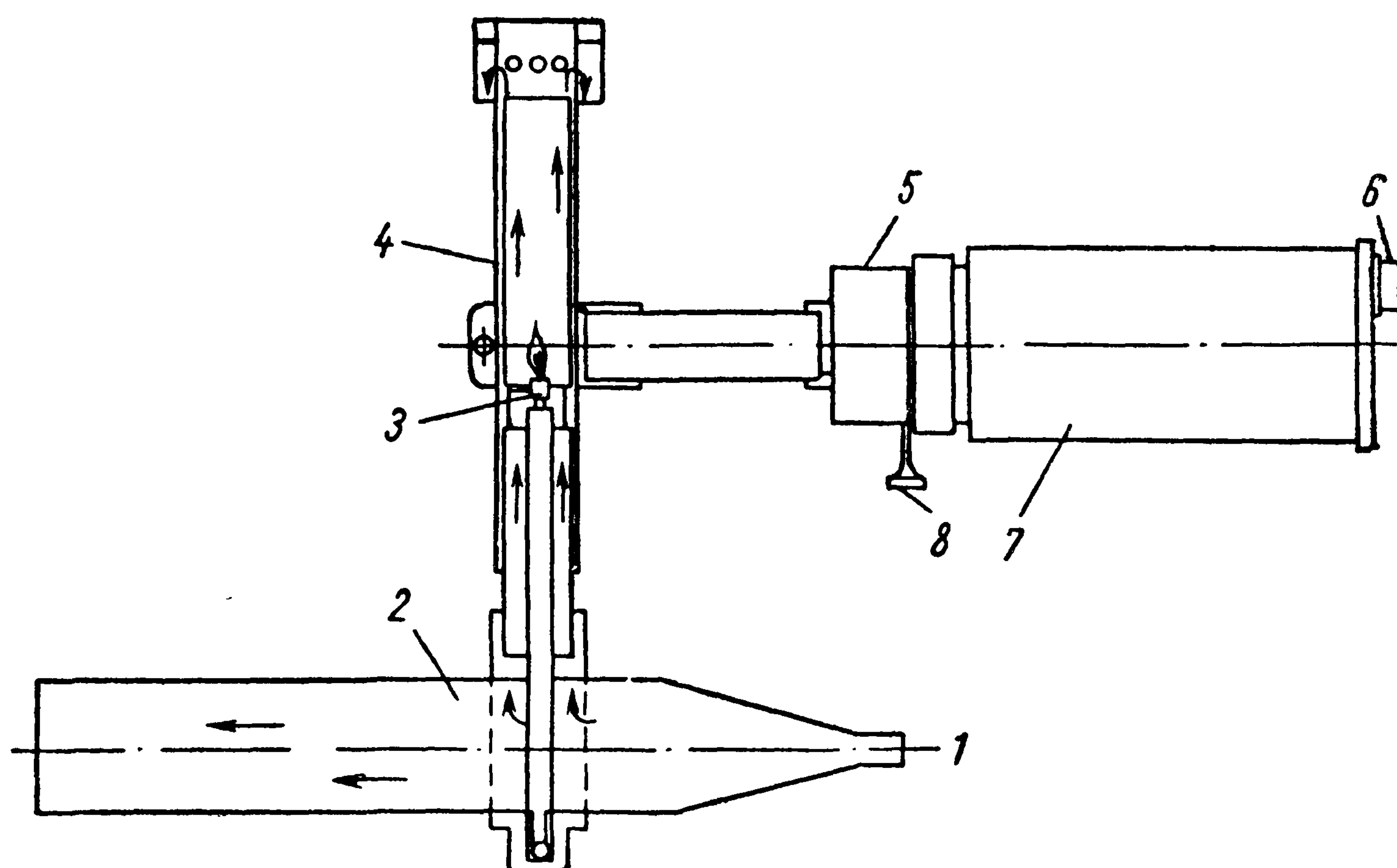


Рис. 6.3. Схема пламенного фотометра для испытания по аэрозолю хлористого натрия:

1 — проба аэрозоля; *2* — пробоотборная трубка; *3* — горелка; *4* — посеребренная стеклянная трубка; *5* — натриевый интерференционный и нейтральный светофильтры; *6* — подвод питания и съем фототока; *7* — камера фотоумножителя; *8* — заслонка.

фильтр регулирует плотность света до необходимой для измерения величины (рис. 6.3).

В трубке фотоэлектронного умножителя возникает электрический ток, величина которого пропорциональна падающему на него свету, и этот ток регистрируется на измерительном приборе. Измерительный прибор откалиброван в коэффициентах проскока, поэтому эффективность фильтра определяется почти мгновенно. Когда пробоотбор не производится, через открытый конец пробоотборной трубы фотометра пропускается чистый воздух, чтобы защитить горелку от загрязнений.

Фотометр калибруется следующим образом: отбирают пробу аэрозоля из газохода перед фильтром, затем разбавляют ее чистым воздухом в различных соотношениях, чтобы полностью охватить область необходимых величин (рис. 6.4). Например, 1 *л* исходного аэрозоля плюс 99 *л* чистого воздуха дают концентрацию соли

$\frac{1}{99+1} = \frac{1}{100}$, или 1% от исходной концентрации. Подобно этому 1 *л* исходного аэрозоля и 999 *л* чистого воздуха дают концентрацию $\frac{1}{999+1} = \frac{1}{1000}$, или 0,1% исходной концентрации. Такие разбавления вызывают отклонения на измерительном приборе, эквивалентные коэффициентам проскока 1% и 0,1%. Область таких значений и соответствующие значения на измерительном приборе дадут калибровочную кривую, по которой определяются коэффициенты проскока фильтров.

Для получения разбавлений, соответствующих величинам коэффициентов проскока фильтров от 0,001% и меньше, описанный метод калибровки можно изменить. Если обеспечено постоянство исходной концентрации, то точки на калибровочной прямой будут

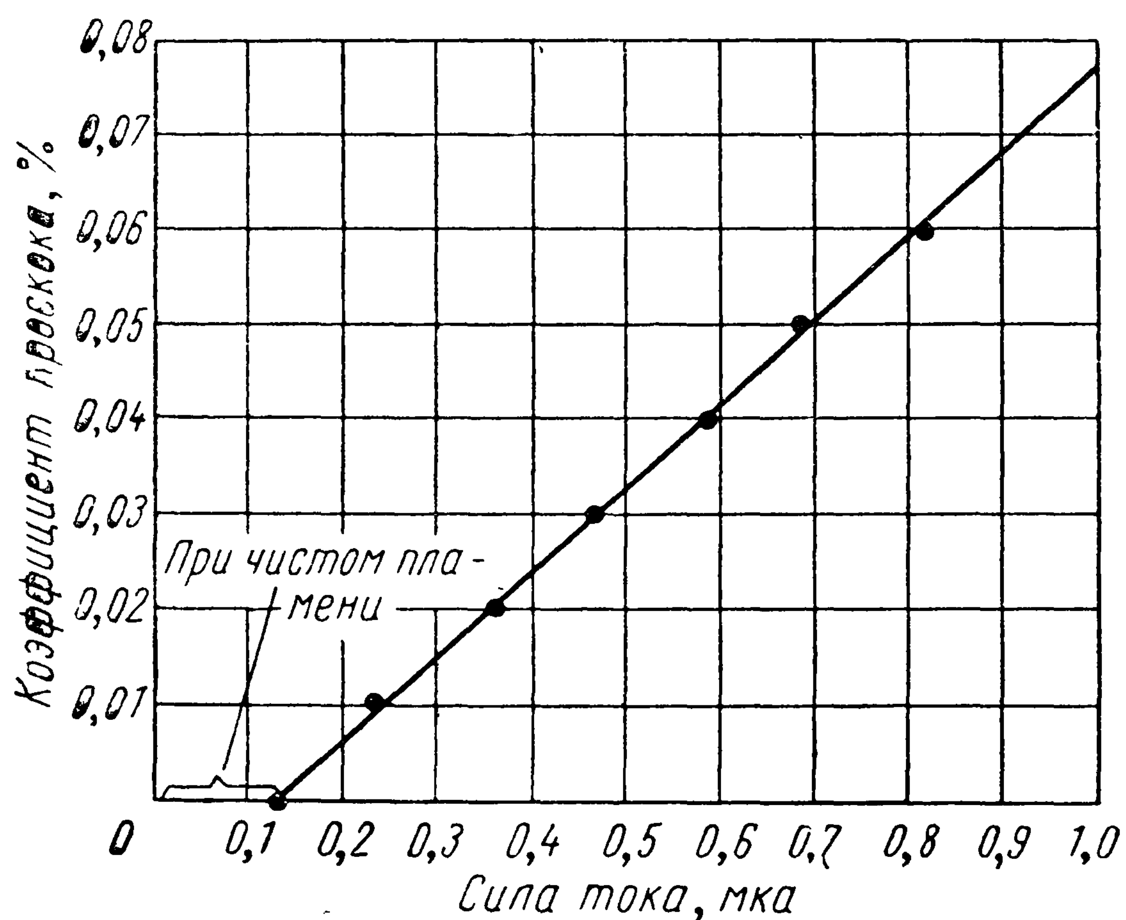


Рис. 6.4. Калибровочная кривая пламенного фотометра для испытаний по аэрозолю хлористого натрия.

лежать на ее продолжении в области низких значений коэффициента проскока. Для гарантии точности оценки в начале каждой серии испытаний через интервалы в 2—3 *ч* проводится корректировка калибровочной кривой.

Испытания по туману диоктилфталата

Первоначально методика этих испытаний была разработана в военно-химической лаборатории США для оценки противогазов, а сейчас широко используется для оценки высокоэффективных аэрозольных фильтров.

В этом методе используются монодисперсные аэрозоли с жидкими частицами размером 0,3 *мкм*, получаемые при конденсации па-

ров диоктилфталата. Туман подается в фильтр с концентрацией 90 *мг/м*^{3}. Пробы тумана отбирают до и после фильтра, а эффективность определяют сравнением концентраций методом светорассеяния с помощью фотоэлектронных устройств. Чувствительность фотоэлектронного нефелометра по определению коэффициента проскока — до 0,001%.

Другие методы

Метод, используемый в научно-исследовательском институте пыли в ФРГ, включает в себя типовые испытания снаряженного фильтра и качественную контрольную оценку фильтрующей среды. Фильтр испытывают по масляному туману с частицами размером от 0,3 до 0,5 *мкм*. Эффективность определяют нефелометром. Этот метод не удовлетворяет требованиям количественных испытаний, так как каждое испытание длится до 20 *мин*.

Аналогичный метод испытаний по масляному туману с частицами размером 0,2—0,3 *мкм* принят в качестве стандартного для контроля фильтров в СССР [2]. Полагают, что более совершенным методом, позволяющим вести быстрое и непрерывное определение, является оценка по аэрозолю, получаемому при барботаже воздуха через раствор гидроокиси кальция, меченного изотопом Ca^{45}.

Фильтрующие материалы для пробоотбора иногда испытывают по естественному атмосферному аэрозолю с частицами размером менее 0,5 *мкм* или по кварцевой пыли, размеры частиц которой меньше 10 *мкм*.

Проводятся также испытания с использованием бактериальных организмов. Так были использованы два вида организмов: споровые Bacilus Subtilis размером 1 *мкм* и фаги размером 0,03 *мкм*. Эффективность бумаги из стекловолокна составила по первым 0,0001% и по вторым — 0,0036%; коэффициент проскока по аэрозолю хлористого натрия равнялся 0,009%. В данном случае интересны соотношения коэффициентов проскока и размеров частиц (см. гл. III). Испытания этого вида, охватывающие фильтры с различными рабочими характеристиками, позволяют выявить определенную корреляцию и могут быть весьма ценными для специальных применений. Однако они имеют специфические особенности и требуют некоторого опыта в работе с микроорганизмами. Следовательно, эти методы целесообразно использовать в области биологии.

Методы пламенной фотометрии по натрию и с туманом диоктилфталата можно использовать для исследовательских целей при разработке фильтров, а также для обнаружения неисправностей в работающих фильтрах. Для испытаний фильтрующих установок в производственных условиях были разработаны специальные методики. Наиболее подходящим оказалось оборудование, аналогичное используемому в нефелометрическом методе. Туман диоктилфталата, обычно получаемый распылением сжатым воздухом, направляют в газоход вентиляционной системы перед фильтрующей установкой. Отбираемая из газохода непосредственно после фильтров проба

содержит частицы, проникшие как через фильтрующие материалы, так и через места повреждений в нем и неплотности. Затем сравнивают эффективность полной установки со стандартным показателем фильтров.

Сравнение методов определения эффективности

Преимущества метода испытаний по аэрозолю метиленовой голубой состоят в том, что он требует очень простое оборудование и его можно применять для определения коэффициентов проскока в диапазоне от 0,01 до 50%. Однако этот метод требует гораздо большего времени, чем методы пламенной фотометрии по натрию и нефелометрии по туману диоктилфталата. Вследствие этого метод испытаний по метиленовой голубой пригоден для сравнительно точных и быстрых количественных испытаний эффективных воздушных фильтров большой производительности [3].

Достоинство метода испытаний по туману диоктилфталата заключается в возможности получения монодисперсных туманов с частицами размером 0,3 *мкм*. Однако существенным недостатком его является то, что частицы жидкие и испытания должны быть кратковременными, так как коэффициент проскока постоянно возрастает, вероятно, вследствие стягивания волокон при промасливании [4,5]. Необходимая аппаратура для этого метода довольно дорогая и требует очень аккуратного обращения и постоянного ухода.

Преимуществом метода испытаний по пламенной натриевой фотометрии является возможность применения его при повышенных температурах: до 300° С при использовании хлористого натрия и, вероятно, до 500° при использовании иодистого натрия.

Наличие различных методов испытаний выдвигает проблему разработки корреляции результатов, полученных разными методами.

Результаты, получаемые при испытаниях по хлористому натрию и метиленовой голубой, почти не различаются благодаря возможности контроля и управления процессом образования аэрозолей. К тому же распределение частиц по размерам в обоих методах почти одинаковое. Сравнивать результаты, получаемые с помощью пламенной фотометрии и тумана диоктилфталата, гораздо труднее. Были проведены прямые сравнительные испытания с использованием обоих методов при одинаковых условиях на фильтрующих материалах и на крупных фильтрах [6]. Было показано, что коэффициентам проскока по туману диоктилфталата в пределах от 0,002% до 0,1% по аэрозолю хлористого натрия соответствуют величины в 2 — 2,5 раза больше.

Высокоэффективные аэрозольные фильтры становятся стандартными для атомных, фармацевтических, бактериологических, химических и других производств во всех странах мира, они требуют общих строгих стандартов на процессы фильтрации. Было бы крайне желательно, чтобы был единый международный метод испытаний.

Определение сопротивления фильтров

Весьма ценные данные о соответствии параметров фильтрующей среды показателям готовых фильтров могут показать испытания их на сопротивление воздушному потоку. Эта характеристика определяется при контроле образцов и в типовых испытаниях. Сущность испытаний заключается в пропускании воздуха через фильтр при максимальной скорости и измерении перепада давлений (в *мм вод. ст.*). Эта величина должна лежать в пределах технических требований на фильтр.

В некоторых случаях фильтры в корпусах, предназначенные для работы под давлением или под вакуумом, испытываются в условиях, соответствующих специфике их действительной работы.

Испытания на забивание

Наиболее важной характеристикой высокоэффективных фильтров после эффективности является длительность непрерывной работы. Эту характеристику можно получить, определив рост сопротивления фильтра в зависимости от количества введенной в него пыли (размер частиц в аэрозолях, используемых при опытном запылении и в условиях эксплуатации, должен быть одинаковым). Наиболее часто для этих целей используют сажу при низкой входной концентрации ($\sim$3 *мг/м*^{3} и меньше). Испытания обычно состоят из нескольких циклов с одинаковым увеличением сопротивления от цикла к циклу. Коэффициент проскока по хлористому натрию определяют после каждого цикла. Типичные кривые зависимости ΔP от нагрузки пыли для различных фильтрующих материалов приведены в гл. IV.

Другие виды испытаний снаряженных фильтров

Фильтры, предназначенные для работы в условиях высокой температуры, должны подвергаться специальным испытаниям с целью определения максимально допустимой температуры и стойкости к случайному возгоранию. Так как в большинстве высокотемпературных фильтров применяются огнеупорные глины или аналогичные керамические герметизирующие составы, их поведение должно быть проверено при высоких температурах. Неправильный выбор герметизирующего состава или некачественное его применение может вызвать его чрезмерную усадку с образованием трещин и с соответствующей потерей эффективности фильтрации.

Фильтры, предназначенные для работы в химически агрессивных средах, должны подвергаться специальным испытаниям в условиях, близких к условиям их эксплуатации. Проведение этих испытаний весьма трудоемко и сложно, в большинстве случаев они возможны только в заводских лабораториях. Чаще проводят ускоренные испытания отдельных элементов фильтра.

Контрольные и типовые испытания отдельных частей фильтра

Основным элементом фильтра является фильтрующая среда; полную ответственность за ее качество (состав волокнистых смесок и технологию изготовления) несет поставщик. Качественный контроль материалов при снаряжении образцов обычно проводит завод — изготовитель фильтров. Образцы материалов, отбираемые от каждого рулона или кипы, подлежат типовым испытаниям по следующим показателям:

1. Вес (обычно в *г/м*^{2}).
2. Толщина (измеряется с помощью микрометрического толщиномера между пластинами в нескольких местах всего образца).
3. Сопротивление (измеряется при скорости воздуха 2,3 *см/сек*).
4. Коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой (определяется при скорости 2,3 *см/сек*).

Материалы, не удовлетворяющие стандартным требованиям, возвращаются поставщику. Дополнительно проводится оценка прочности на разрыв и продавливание.

Клей и герметизирующие составы поставляются также в соответствии с требованиями стандартов, однако проводится периодический контроль качества твердых компонентов (органические растворители позволяют получить клей на основе каучука, а вода используется для получения керамических замазок и паст) или проверяются время и степень схватывания клеев (эпоксидные или полиэфирные смолы). Кроме оценки качества клеев и цементных замазок при приемочных испытаниях готовых образцов фильтров необходимо проводить контроль степени усадки связующих как на основе керамики, так и на каучуковой основе. В последнем случае в качестве наполнителей используются порошок силикагеля, металлический порошок, мел. Прилипание должно обеспечиваться при таком содержании наполнителей, которое обеспечивает минимальную усадку при высушивании. Проблема борьбы с чрезмерной усадкой и растрескиванием наиболее остро стоит при использовании керамических цементов и теплостойких клеев. Чрезмерное сжатие может быть вызвано как высокой скоростью сушки, так и избыточным содержанием воды или растворителя. Следовательно, для установления оптимального времени сушки должны проводиться типовые испытания. Полученная информация позволит провести сопоставление данных испытаний готовых образцов фильтров с производственными требованиями и возможностями.

Материалы, к которым предъявляется требование повышенной или специфической химической стойкости, целесообразно подвергать типовым ускоренным испытаниям, но не таким строгим, как испытания готовых образцов. Дело в том, что обычно сведения об исходных материалах хорошо известны, и они полностью удовлетворяют производственников. На большинство широко используемых синтетических материалов могут разрушающе действовать пары органи-

ческих растворителей, особенно растворители в жидком виде. Однако в процессе эксплуатации возникновение взрывоопасных смесей органических паров происходит при гораздо более низких концентрациях. Имеющиеся в справочниках показатели химической стойкости определены при значительно более тяжелых условиях, чем этого требуют методики типовых испытаний, поэтому правильный выбор пластмасс по официальным данным, основанный на знании состава очищаемых выбросов, гарантирует успешную работу фильтров.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Фильтрующая среда

Сущность метода испытаний фильтрующего материала на прочность разрыву заключается в следующем. Круглый образец бумаги закрепляют в держателе с помощью диска с отверстием диаметром 101,6 *мм* (рис. 6.5). Затем в держатель подают воздух до тех пор,

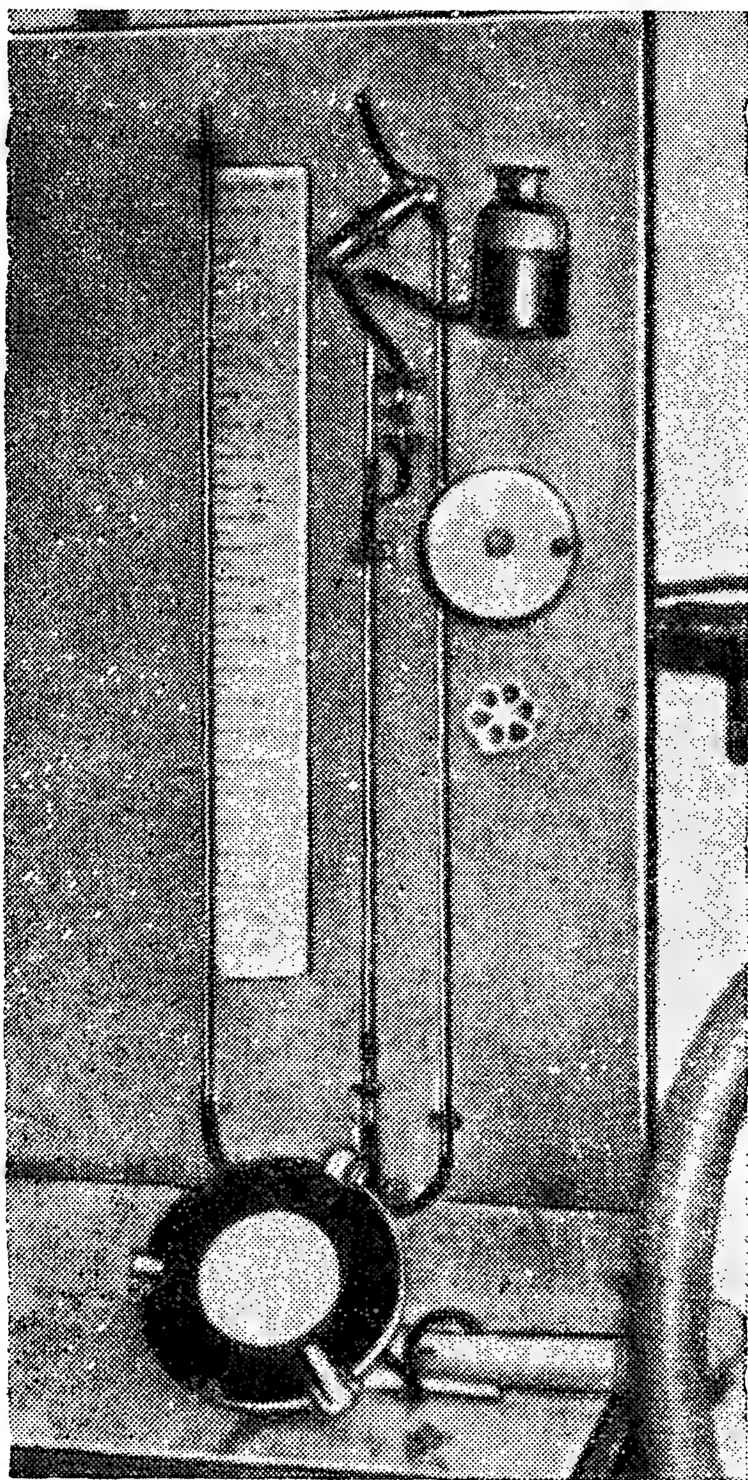


Рис. 6.5. Прибор для испытания бумаги на прочность разрыву.

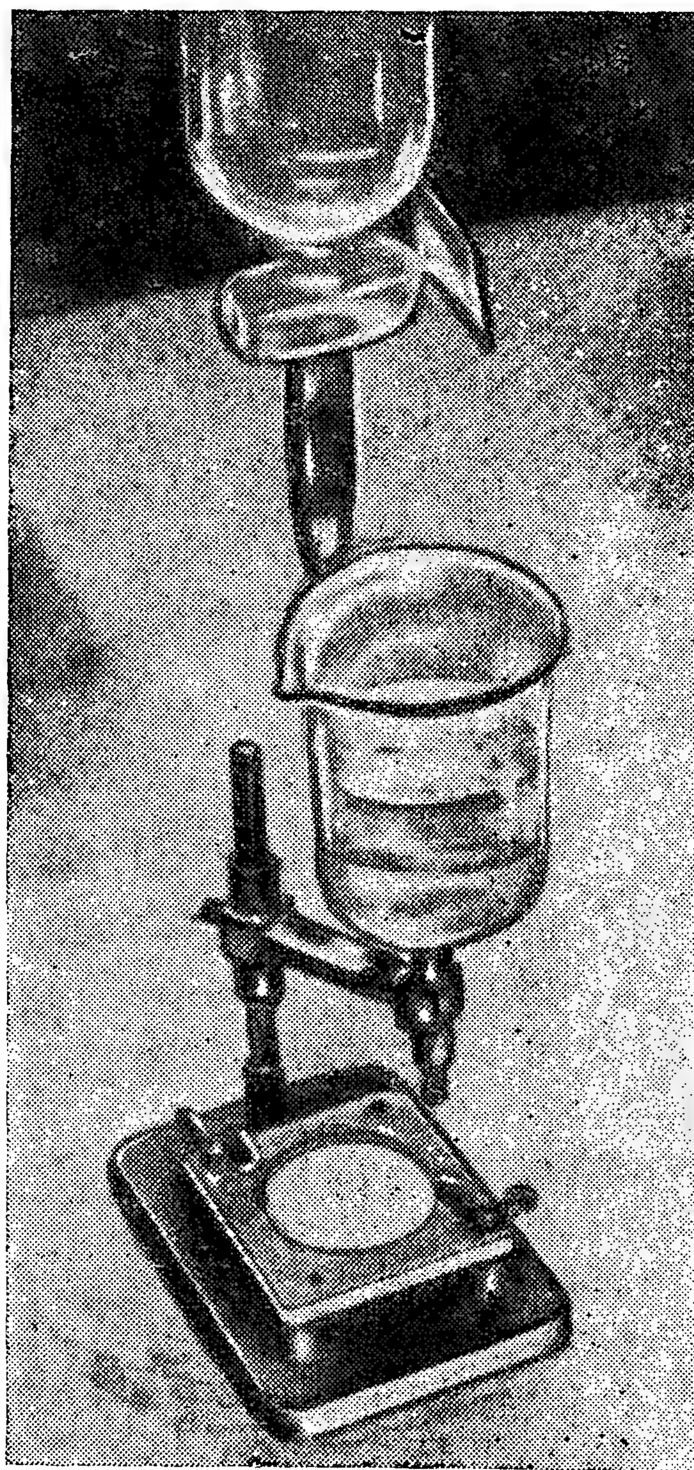


Рис. 6.6. Прибор для испытания бумаги на продавливание.

пока образец не лопнет. При этом отмечают величину перепада давления в момент разрыва.

Другим испытанием прочности бумаги является испытание на продавливание. Образец фильтрующей бумаги укрепляют в строго горизонтальном положении с помощью зажима с отверстием диаметром 50,8 *мм*. Зонд диаметром 8 *мм* конусностью 30° (диаметр торца равен 4,8 *мм*) устанавливают над центром диска. В стакан, соединенный с зондом, льют воду до тех пор, пока зонд не продавит бумагу (рис. 6.6).

Аналогичным испытаниям на прочность подвергаются высокотемпературные фильтрующие материалы при повышенных температурах, а также обычные фильтрующие бумаги после их предварительного нагрева и последующего охлаждения. Очень часто прочность бумаги уменьшается с увеличением температуры.

Испытание прочности фильтрующих материалов на изгиб проводят с целью оценки способности материала к гофрированию. Лента бумаги длиной 150 *мм* и шириной 75 *мм* сгибается машиной на 180° на оправке диаметром 1,6 *мм*. После этих испытаний материал на месте перегибов не должен иметь порывов, трещин и отслоений. Одна из спецификаций требует, чтобы среда по месту изгибов сохраняла 50% прочности на разрыв.

Для установления прочности мокрых фильтрующих материалов существует несколько методов. По одному из них образец выдерживают в парах воды в течение 30 *мин*, после чего испытывают на прочность разрыву и продавливанию. По другому методу образец перед испытаниями выдерживают в воде в течение 15 *мин*. Существуют и другие испытания, которые проводятся для оценки специфических показателей, например водоотталкивающих свойств (в тех случаях, когда бумаги подвергаются обработке силиконами или другим методам гидрофобизации), стойкости к кислотам, плесеням, гниению.

Фильтрующие установки

Фильтрующий материал высокоэффективных аэрозольных фильтров весьма чувствителен к повреждениям, поэтому их конструкция должна быть достаточно прочной, чтобы сохранить свойства материала при изменении рабочих условий, при транспортировке и неосторожном обращении. Следует подчеркнуть обязательную необходимость обеспечения равноценности механической прочности всех элементов установки и ее сохранения в эксплуатации. Это особенно важно в установках, предназначенных для улавливания токсичных и радиоактивных пылей, бактериальных аэрозолей и других опасных веществ.

В вентиляционных системах фильтры должны выдерживать накопление такого количества пыли, которое вызовет увеличение сопротивления до 300 *мм вод. ст.* Для установления сроков службы фильтров необходимы строгие испытания, особенно в отношении

фильтрующих материалов. Пульсации воздушного потока, вызываемые турбулентностью или работой вентиляторов, вибрация фильтров, влажность и другие факторы влияют на работу фильтров в вентиляционных системах.

Следовательно, фильтры необходимо подвергнуть целой серии испытаний на прочность, чтобы воспроизвести условия, существующие при их эксплуатации. Строгие требования испытаний направ-

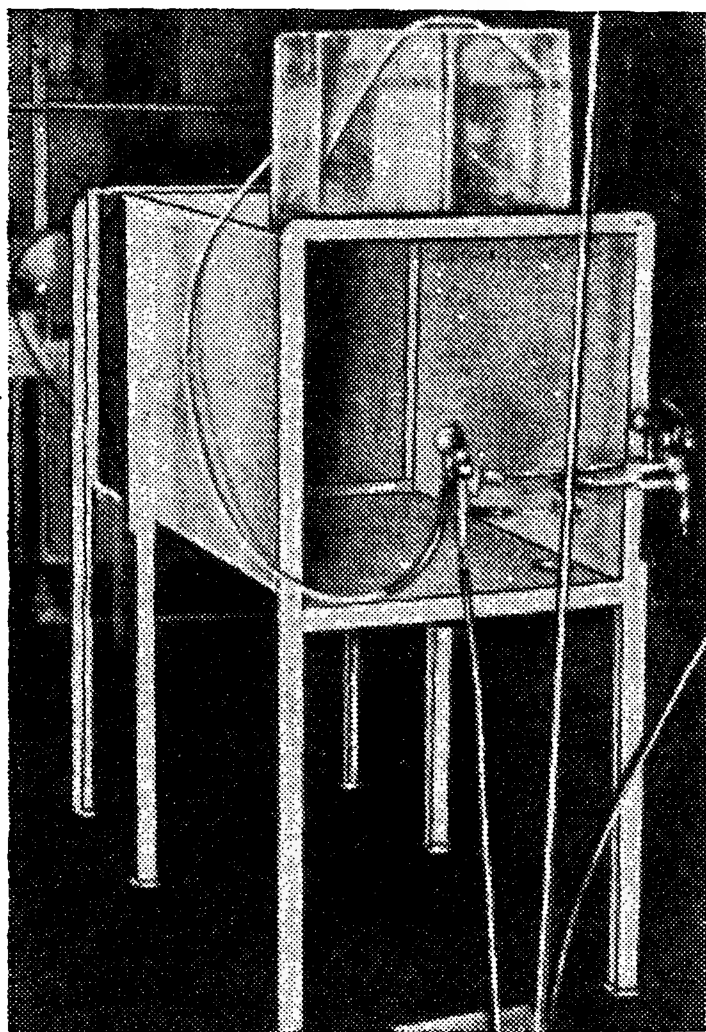


Рис. 6.7. Установка для испытания на влагостойкость и воздействие пульсаций воздушного потока.

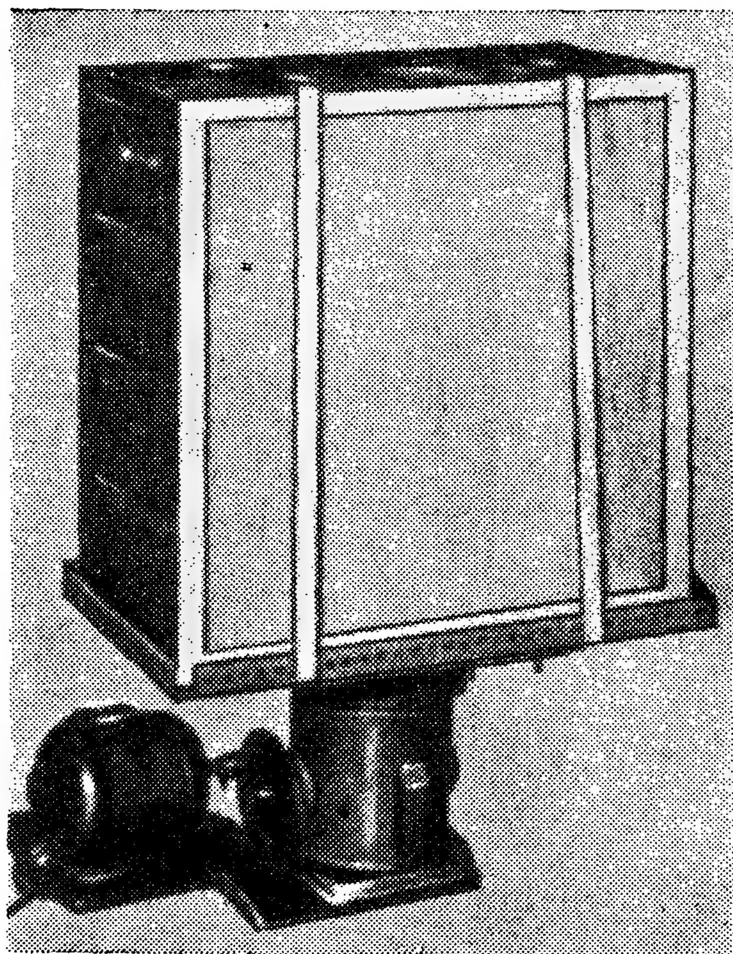


Рис. 6.8. Прибор для вибрационных испытаний.

лены на то, чтобы выявить слабые места в фильтрующей среде и материалах конструкции. Аналогичные испытания проводятся и с высокотемпературными фильтрами. Такие испытания обычно проводят как типовые, хотя при монтаже очень больших и ответственных установок оценочным испытаниям подвергается только 2% всех фильтров.

Комбинированные испытания на влагостойкость и воздействие пульсаций воздушного потока (рис. 6.7). Фильтр производительностью 1700 *м*^{3}/*ч*, имеющий коэффициент проскока по аэрозолю хлористого натрия 0,01%, был запылен до сопротивления 254 *мм вод. ст.* Пульсации воздушного потока создавались за счет вращения дроссельной заслонки при 150 оборотах в минуту. Расход воздуха при этом изменялся от 1450 до 1700 *м*^{3}/*ч*. Пульсации продолжались 6 *ч*, затем в течение 40 *мин* в газоход перед фильтром вспрыскивалось 12 *л* воды. Воду вводили в избыточном количестве, чтобы иметь в воздухе 10%-ный избыток свободной воды по сравне-

нию с насыщением. После орошения пульсации воздуха продолжались 1 *ч*, и вся эта процедура повторялась еще два раза. Таким образом, общий расход воды составил 36 *л*, пульсации длились по 3 *ч*. После этого фильтр был оставлен на ночь для сушки, а затем в газоход перед ним ввели еще 21 *л* воды за 70 *мин*. После завершения всех испытаний не было замечено никаких повреждений фильтрующей среды и мест уплотнений.

Затем фильтр был подвергнут тщательным испытаниям на механическую прочность с целью определения максимального перепада давления, при котором фильтрующая среда разрывается. Для увеличения перепада давления на фильтре в него ввели сажу, причем скорость роста перепада давления составляла 25 *мм вод. ст./ч*. После введения в фильтр 4700 *г* сажи фильтрующая среда разрушилась при сопротивлении 737 *мм вод. ст.*

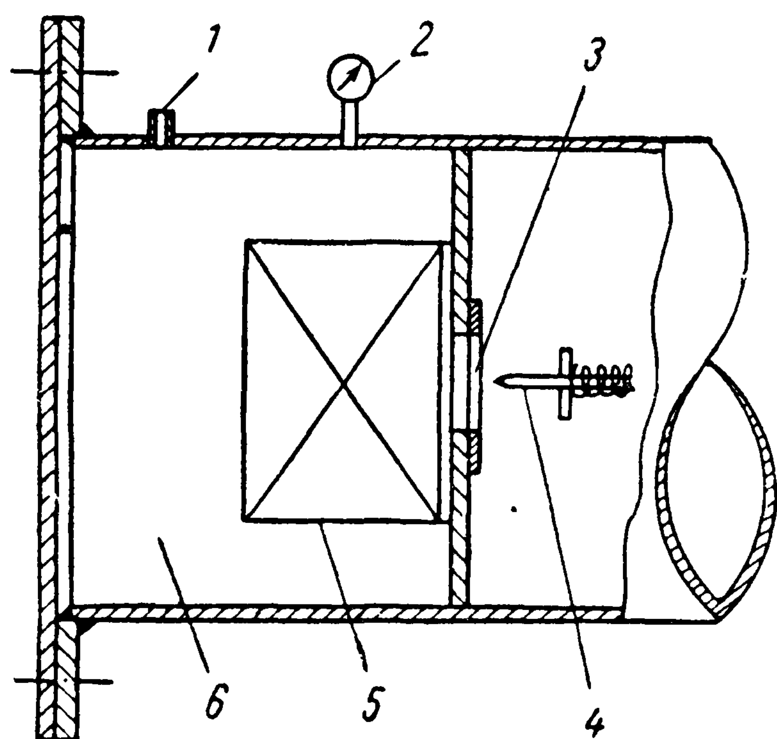


Рис. 6.9. Установка для испытания фильтров на устойчивость к воздушным ударам:

1 — входное отверстие; *2* — манометр; *3* — диафрагма; *4* — игла; *5* — фильтр; *6* — камера давления.

Вибрационные испытания (рис. 6.8). Образец закрепляется на платформе вибрационного сита, которое совершает 300 колебаний в минуту с амплитудой 9,5 *мм*. Поверхность платформы имеет наклон в несколько градусов и постепенно перемещается по кругу.

Фильтр, подвергнутый воздействию 178 000 колебаний, имел такой же коэффициент проскока, как и до испытаний: 0,01% по аэрозолю хлористого натрия.

Тепловые циклические испытания. Перед началом тепловых испытаний фильтра был определен коэффициент проскока по аэрозолю хлористого натрия. Он оказался равным 0,02%.

Тепловые циклические испытания были проведены при трех различных температурах: сначала при 200° С, затем при 350° С и, наконец, при 420 ° С. Фильтр был помещен в печь, температура в которой медленно поднималась до требуемой величины и затем поддерживалась в течение 2 *ч*. После этого шло охлаждение в течение ночи. Фильтр удаляли из печи, внимательно осматривали для выявления видимых повреждений и затем испытывали по аэрозолю хлористого натрия при стандартных условиях.

После нагревания до 350° С в двух-трех местах цементной замазки были обнаружены незначительные трещины, которые не увеличивались до 420° С.

Никаких серьезных повреждений не было замечено. Коэффициент проскока по аэрозолю хлористого натрия после завершения испытаний равнялся 0,05%.

Испытания фильтров на воздействие воздушных ударов. Эти испытания проводятся внутри цилиндрической камеры, разделенной в центре на две части перегородкой с отверстием (рис. 6.9). Фильтр укрепляют на одной из сторон перегородки лицевой стороной к отверстию. С другой стороны перегородки отверстие перекрывается диафрагмой, герметизирующей отсек с фильтром. В герметический отсек нагнетается компрессором воздух до определенного давления, затем диафрагма мгновенно разрывается иглой электромагнитного устройства. В результате возникает резкий скачок перепада давления на фильтре. Фильтр, подвергнутый нескольким таким испытаниям, оставался без изменений до давления в герметичном отсеке 0,63 *кг/см*^{2} (в каждом последующем опыте давление увеличивалось на 0,07 *кг/см*^{2}). После этого были обнаружены повреждения в фильтрующей среде.

ИСПЫТАНИЯ ФИЛЬТРОВ НА ОГНЕСТОЙКОСТЬ

Наиболее экономичной огнестойкой фильтрующей средой является бумага из стекловолокна. Продолжительность сроков службы фильтров можно увеличить использованием искроуловителей, специальных предфильтров и различных огнепреградителей. Для оценки огнестойкости негорючих типовых фильтров их необходимо подвергать испытаниям.

Оценка искроулавливающих свойств. Искроуловители должны задерживать горячие твердые частицы, которыми могут быть медленно горящие углеродсодержащие материалы или раскаленные металлические частицы различных размеров. Искроуловители не должны изменять своих свойств от действия наиболее горячих и медленно охлаждающихся частиц. Очень важно, чтобы их установка не нарушала нормальной работы вентиляционных систем.

Любые частицы, проникшие через искроуловитель, будут иметь определенное время жизни, зависящее от их размера и скорости горения; по-видимому, частицы должны быть настолько мелкими, чтобы при достижении фильтра тонкой очистки они были неопасными для него.

Следовательно, при испытании искроуловителей необходимо оценить стойкость материала к воздействию потока искр, время, через которое они прожгут материал, количество всех проникших частиц и сопротивление потоку воздуха. Металлические искры можно получить путем всасывания металлического порошка потоком воздуха, подаваемого на горелку Бунзена, или от шлифовального круга; углеродсодержащие частицы получают сжиганием бумаги, ветоши, угля и других материалов.

Испытания на термо- и огнестойкость

Наиболее простым методом испытаний на термостойкость является помещение устройства в горячую печь на определенный период с последующей оценкой прочности, деформаций и т. д. При

таком испытании можно выявить неподходящие элементы уплотнений. Если разрушения неочевидны, то проводится оценка коэффициента проскока.

Фильтры также могут быть испытаны в реальных условиях, при ступенчатом повышении температуры до появления повреждений (рис. 6.10).

Если высокотемпературные фильтры должны быть испытаны при температуре 400° С и выше, воздух можно нагревать пропано-

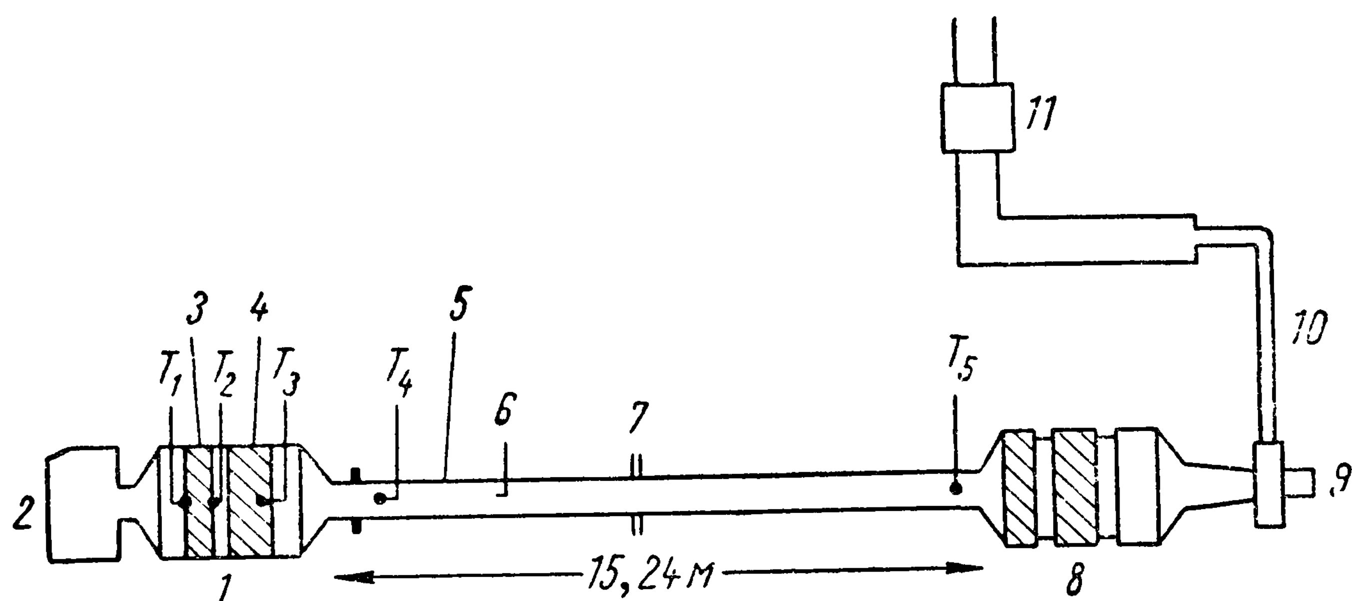


Рис. 6.10. Схема стенда для испытания фильтров на огнестойкость:

1 — испытуемый образец двухступенчатого фильтра; *2* — камера сгорания; *3* — предфильтр; *4* — основной фильтр; *5* — газоход; *6* — трубка Пито; *7* — регулируемый подсос воздуха; *8* — предохранительный высокоэффективный двухступенчатый фильтр; *9* — вспомогательный вентилятор; *10* — гибкий трубопровод; *11* — вентилятор (T_1, T_2, T_3... — термопары).

выми горелками; более низкие температуры достигаются при сжигании легколетучих растворителей, хотя стабильность процесса в этом случае меньше.

Этот вид испытаний пригоден для оценки различных комбинаций фильтров, предфильтров и искроуловителей, а также для оценки способности к возгоранию фильтров с уловленной пылью. Запыленный фильтр может быть взят из работающей системы или после специального запыления модельной пылью.

Такую аппаратуру можно оборудовать приборами для оценки коэффициента проскока при повышенной температуре, используя, например, аэрозоль хлористого натрия.

Комиссия по атомной энергии США разработала технические условия для оценки характеристик огнестойкости высокоэффективных фильтров [7]. Согласно этим условиям, фильтры испытываются при температуре 371° С в течение 5 *мин*, кроме того, непосредственно перед фильтрующей средой на 5 *мин* помещают пламя от горелки Бунзена.

ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Несмотря на то что испытания в соответствии с техническими условиями являются наиболее представительными, следует иметь в виду, что характер испытаний всегда определяется требованиями

к конкретным установкам. Условия, при которых могут применяться высокоэффективные аэрозольные фильтры, весьма разнообразны. В некоторых случаях строгое следование стандартам не оправдывается вследствие высокой стоимости как испытаний, так и работ по обеспечению высокой эффективности.

Рассматриваемые ниже требования на изготовление фильтров и их испытания необходимы только как основа технических условий на любые конкретные фильтры. Совершенно очевидно, что такие требования не могут быть написаны в каких-либо абсолютных значениях, они могут в основном служить формой ТУ на высокоэффективные фильтры.

Технические условия на высокотемпературные абсолютные фильтры производительностью 1700 *м*^{3}/*ч*

Общие положения. Фильтр должен снаряжаться стекловолокнистой бумагой, листы которой отделяются друг от друга металлическими разделителями и уплотняются в металлическом корпусе огнестойким цементом. Одна или обе торцовые стороны корпуса должны оснащаться уплотняющими прокладками для герметизации корпуса в установке. Фильтр не должен изменять своих качеств после нагревания до 500° С.

Фильтрующий материал. Фильтрующая бумага должна представлять собой плотные листы из стеклянных волокон подходящего размера. Механические качества и коэффициент проскока бумаги не должны изменяться в результате воздействия разделителей. Бумага должна удовлетворять требованиям, изложенным в приложении I настоящих ТУ; любой материал, не удовлетворяющий хотя бы одному из этих требований, считается непригодным.

Корпус. Корпус фильтра должен изготовляться из стальных листов толщиной 1,3 *мм* и быть достаточно жестким, чтобы не допускать разрушения цементных уплотнений в результате тепловых и механических напряжений, возникающих при эксплуатации.

Уплотнение корпуса должно осуществляться по фланцам, представляющим собой отбортованные кромки листов, при минимальном перекосе корпуса во время транспортировки, при монтаже фильтра в установке и в период эксплуатации установки.

Для облегчения обращения каждый фильтр должен иметь две ручки, удобно размещенные на противоположных сторонах корпуса.

Для удовлетворения требований точности монтажа фильтров в самых разнообразных установках технологические допуски, относящиеся к полным размерам корпуса, возможные изгибы и перекосы должны строго выдерживаться.

Длина каждой стороны фильтра должна быть 610 $\pm$ 1,6 *мм*, глубина вместе с уплотнениями — 280 $\pm$ 0,8 *мм*. Эти размеры относятся к каждому ребру. Незначительные внешние изгибы на стенках, вызванные усадкой цементов или давлением на корпус, не должны

изменять указанных размеров больше чем на 1,6 *мм* по лобовой стороне фильтра и на 0,4 *мм* по его глубине. Длина наибольшей диагонали при перекосе корпуса не должна превышать 855 *мм*.

Цементное уплотнение. Цемент должен прочно закреплять и уплотнять крайние листы пакета фильтрующей бумаги по всему периметру стального корпуса. Он должен быть достаточно упругим, чтобы допускать незначительные деформации корпуса, возникающие при давлении на него. В уплотнении не должно возникнуть трещин и нарушения герметичности при нагреве до 500° С.

Прокладки. Прокладки должны служить уплотнением между фильтром и корпусом установки, их материал по термостойкости должен быть одинаков с фильтрующей средой.

Разделители. Разделители должны быть негорючими и сохранять механическую прочность при температуре — 500° С. Для предотвращения повреждений фильтрующей бумаги углы разделителей должны иметь закругленную форму.

Отделка. Внешняя поверхность металлического корпуса должна иметь защитные покрытия.

Испытания. Каждый фильтр должен быть испытан по аэрозолю метиленовой голубой и должен иметь следующую маркировку:

Тип фильтра; производительность, $м^3/ч$; сопротивление, *мм вод. ст.*; коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой; номер партии; направление входа воздуха.

Упаковка. Каждый фильтр должен быть упакован в прочную картонную коробку, обеспечивающую безопасную транспортировку и складирование. На коробке должны быть надписи с указанием типа фильтра.

Приложение I

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ НА ФИЛЬТРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ

Общие положения. Для определения рабочих характеристик фильтрующего материала перед снаряжением фильтра от каждого рулона стекловолокнистой бумаги отбирается полоса длиной около 3 *м*, которая подвергается испытаниям в соответствии с техническими требованиями. Каждый рулон, образец из которого не удовлетворяет требованиям, должен браковаться.

Приемочные испытания. Вес фильтрующего материала должен быть в пределах от 103 до 118 $г/м^2$.

Толщина (средняя по четырем образцам, взятым в разных углах листа) должна быть в пределах от 0,5 до 0,75 *мм*.

Сопротивление потоку воздуха должно быть не более 17,8 *мм вод. ст.* при скорости воздуха 2,3 *см/сек*.

Коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой должен быть не более 0,001%.

Прочность на разрыв определяется следующим образом. Образец бумаги закрепляется в держателе с помощью шайбы с внутренним диаметром 104 *мм* и через него пропускается поток воздуха, скорость которого непрерывно и постепенно увеличивается до тех пор, пока бумага не разорвется. Сопротивление в момент разрыва должно быть не менее 508 *мм вод. ст.* После нагрева бумаги до 300° С в течение 30 *мин* и последующего охлаждения разрыв бумаги должен происходить при сопротивлении не менее 330 *мм вод. ст.*

Испытания на продавливание. Образец бумаги закрепляется в держателе горизонтально с помощью шайбы с внутренним диаметром 50,4 *мм*. Зонд диаметром 8 *мм* конусностью 30° и с торцом диаметром 4,8 *мм* должен быть установлен в центре бумаги и постепенно нагружаться до тех пор, пока не наступит продавливание.

Бумага должна иметь такую прочность, чтобы продавливание наступало при нагрузке не менее 200 *г*, включая вес самого зонда. После нагрева нагрузка в момент продавливания должна быть не менее 100 *г*.

Приложение II

ПРИЕМОЧНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГОТОВЫХ ОБРАЗЦОВ

1. После снаряжения каждый образец должен быть испытан на сопротивление потоку воздуха и коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой. Для обеспечения равномерного распределения частиц в объеме аэрозоль перед поступлением в фильтр должен быть хорошо перемешан. Монтаж образца на испытательном стенде осуществляют так, чтобы исключить утечки и подсосы по местам уплотнения корпуса.

Любые установки, не удовлетворяющие этому требованию, считаются непригодными.

Сопротивление при расходе 1700 $м^3/ч$ должно быть не более 28 *мм вод. ст.*; коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой — не более 0,01%.

2. Приемная комиссия должна установить, что не произошло никаких изменений качества фильтрующей среды, которые бы снизили пылеемкость фильтра. По просьбе комиссии могут быть проведены испытания фильтра на пылеемкость, чтобы установить, что образец накапливает не менее 1 *кг* сажи при увеличении сопротивления до 126 *мм вод. ст.*

3. По требованию комиссии могут быть проведены испытания фильтрующей среды на прочность: сажа подается в образец фильтра до тех пор, пока не появится повреждение или не увеличится коэффициент проскока. Сопротивление фильтра в этот момент должно быть не менее 300 *мм вод. ст.*

ЛИТЕРАТУРА

1. Dorman R. et al, CDEE Porton Techn. Note No. 99 (1959).
2. Пречистенский С. Радиоактивные выбросы в атмосферу. М., Госатомиздат, 1961.
3. Dorman R., Yeates L. CDEE Porton Techn. Note No. 131 (1960).
4. Dorman R. Sympos. on Dust Control and Air Cleaning. Inst. Mech. Engrs, 1963.
5. Silverman L. 7th AEC Air Cleaning Conference Handbook TID, 7627, p 211.
6. Dorman R. (частное сообщение).
7. American Military Specification Mil-F-51079, Filter medium, Fire-resistant, High efficiency.
8. Underwriters Laboratories Inc. USA Specification — 586.

Глава VII

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА ВОЗДУХА ОТ ПЫЛИ

Концентрация пыли в воздухе перед высокоэффективными фильтрами должна быть не больше 1 *мг/м*^{3}, иначе из-за относительно низкой пылеемкости потребовалась бы слишком частая замена их. Очевидно, чем ниже концентрация пыли, тем продолжительнее сроки непрерывной работы фильтров. Поэтому практически во все схемы очистки с использованием высокоэффективных фильтров для снижения начальной концентрации пыли должны включаться предварительные пылеуловители. Только технико-экономические обоснования позволяют решить, превышают ли капитальные и эксплуатационные затраты на первичные пылеуловители экономию, получаемую от снижения частоты замены фильтров.

В этой главе описаны способы пылеулавливания, применение которых в схемах высокоэффективной очистки наиболее целесообразно. Сделана попытка обобщить имеющиеся сведения по использованию обычных промышленных пылеуловителей в схемах высокоэффективной очистки [1—5].

Обычно в технологических процессах, проведение которых должно сопровождаться особенно низкими концентрациями пыли в отходящих газах, выделяются довольно ограниченные количества пыли. Однако даже в этих случаях необходимо обратить особое внимание на возможность снижения концентрации пыли в отходящих газах. Процессы и аппараты должны быть тщательно оценены и спроектированы таким образом, чтобы максимально снизить пылеобразование или предусмотреть устройства, снижающие пылеобразование внутри технологического оборудования. Например, вокруг обычно используемых центрифуг могут создаваться значительные концентрации аэрозолей. Однако в последние годы были сконструированы центрифуги для применения в бактериологических и радиохимических производствах, для которых характерно ничтожное образование аэрозолей.

В зависимости от механизма осаждения частиц способы пылеулавливания можно сгруппировать в несколько классов: гравитационные, инерционные и центробежные, мокрые, электрические, фильтрация.

Гравитационные пылеосадительные камеры

Эти простейшие пылеуловители представляют собой большие камеры, в которых скорость газа снижается настолько, что частицы пыли оседают под действием силы тяжести. Запыленные газы должны находиться в камере достаточно долго, чтобы частицы успели осесть на дно со скоростью несколько меньшей, чем их скорость свободного падения. Конструкция камеры должна быть весьма тщательно отработана для обеспечения хорошего распределения газа на входе и выходе камеры, чтобы время пребывания пыли во всех частях поперечного сечения было одинаковым. Для этой цели используются плавные переходы, отражатели и перфорированные распределительные пластины. Гашение вихрей внутри камеры можно осуществить с помощью цепных завес, стержней или сеток.

При этих условиях эффективность улавливания частиц определяется уравнением

$$E = \frac{100\, U_t L}{HV},$$

где U_t — скорость оседания частиц, *м/сек*; L — длина камеры, *м*; H — высота камеры, *м*; V — скорость газа, *м/сек*.

В табл. 7.1 приведены скорости оседания сферических частиц, определенные по уравнению Стокса.

Таблица 7.1

Скорость оседания сферических частиц плотностью 2,65 *г/см³*

Диаметр частиц, *мкм*	Скорость оседания, *см/сек*
100	80
50	20
25	5
10	0,8
1	0,008

Данные табл. 7.1 становятся неточными для частиц несферической формы, а также в тех случаях, когда в воздухе есть завихрения. Действительные скорости оседания частиц обычно почти в два раза меньше теоретических, что вызывает необходимость увеличения размеров осадительных камер [6].

Аналогичным путем можно показать, что минимальный размер частиц D_p, которые полностью оседают из потока, определяется уравнением

$$D_p = \left(\frac{18\mu HV}{gL(\rho_p - \rho)}\right)^{1/2},$$

где μ — вязкость газа; ρ_p — плотность частиц; ρ — плотность газа.

Скорость газа обычно ограничивают 3 *м/сек* или меньше, предупреждая тем самым чрезмерный унос осажденной пыли [3].

Работа осадительных камер может быть улучшена при устройстве горизонтальных полок, как это сделано в камере Гарвардской лаборатории (рис. 7.1); в этом случае отношение H/L уменьшается. Однако в таких камерах затрудняется удаление с полок уловленной пыли.

Обычно осадительные камеры используются для улавливания частиц размером больше 40 *мкм* (для камер типа Гарвардской от 10 *мкм*) и только при высоких запыленностях. Они не применяются

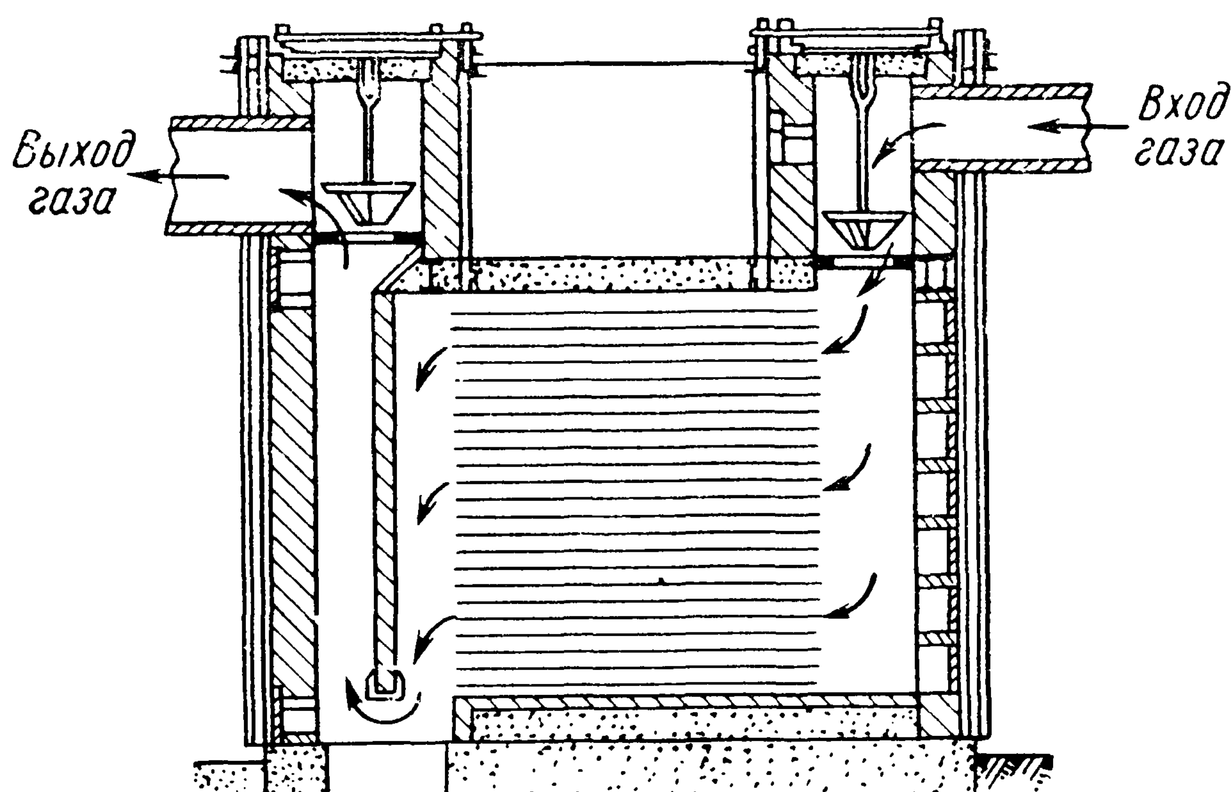


Рис. 7.1. Пылеосадительная камера Гарвардской лаборатории.

в установках, включающих «абсолютные» фильтры, хотя известны примеры их использования в урановом и бериллиевом производствах на операциях грубой механической обработки.

Инерционное и центробежное пылеулавливание

В инерционных пылеуловителях (сепараторах) отражательные перегородки вызывают резкое изменение направления потока газа, в результате этого частицы пыли сталкиваются с поверхностями этих перегородок. Эффективность улавливания заметно возрастает с увеличением размера и плотности частиц, с повышением скорости и уменьшением размеров отражательных препятствий. В промышленности довольно широко применяют различные пылеуловители, в которых используется только инерционный прин-

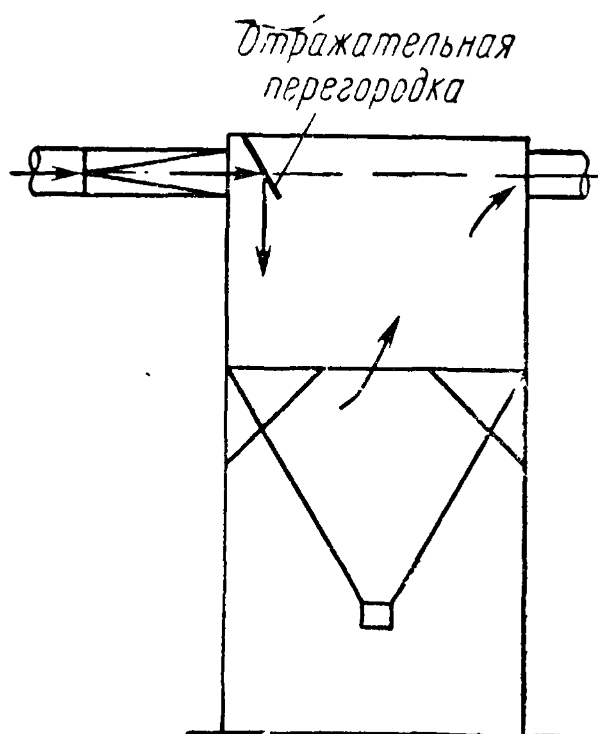


Рис. 7.2. Простейший инерционный сепаратор.

цип или сочетание его с центробежным. Характеристики работы пылеуловителей очень различны не только между различными типами, но и для какого-либо одного типа при улавливании различных материалов.

На рис. 7.2 схематично показан очень простой тип инерционного сепаратора, а на рис. 7.3 показано более сложное устройство — комбинация инерционного аппарата с циклоном.

Скруббер Кодер — Фокс является устройством с ударным принципом действия. Он содержит несколько рядов перфорированных пластин, отверстия которых смещены относительно друг друга.

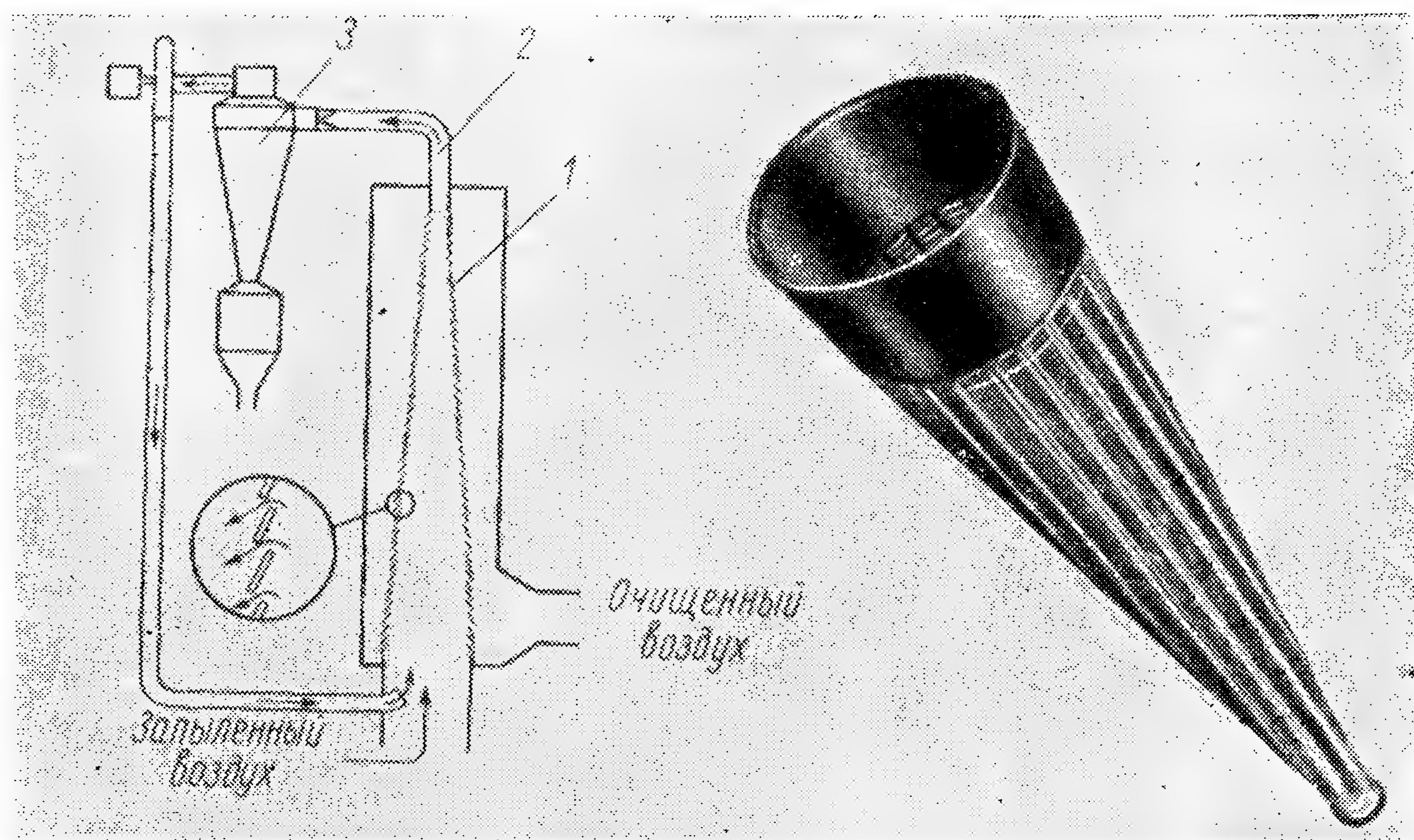


Рис. 7.3. Жалюзийный пылеуловитель «Аэродин»:
1 — первичный пылеуловитель; *2* — частицы пыли, сконцентрированные в 10% воздуха; *3* — вторичный пылеуловитель.

Скруббер часто используется для улавливания тумана серной кислоты. Полагают, что он эффективен для улавливания частиц размером до 2 *мкм* (эффективность очистки 97%). Обычно инерционные пылеуловители применяются при высоких концентрациях пыли с частицами размером более 10 *мкм*. Величины эффективностей лежат в пределах от 50 до 90%.

Циклоны

Циклон имеет цилиндрическую форму с коническим сужением книзу (рис. 7.4). Запыленный газ поступает в верхнюю часть цилиндра тангенциально, образуя таким образом вращательное движение. Этим создается центробежная сила, действующая на частицы пыли, в результате которой скорость радиального осаждения может быть значительно больше установившейся скорости гравита-

ционного оседания. Таким образом, время осаждения частиц на стенки намного меньше, чем время их оседания в осадительной камере. Отброшенная к стенкам пыль непрерывно выпадает в бункер, расположенный в основании циклона.

Теоретически должны выделяться все частицы больше определенного размера, хотя реальная зависимость эффективности от размеров частиц представляет собой плавную кривую (рис. 7.5). Зона *А* на рис. 7.5 содержит частицы, которые должны были бы пройти через циклон, но они улавливаются вследствие коагуляции или в результате столкновений с более крупными частицами. В зоне *Б* находятся частицы, которые должны были бы улавливаться, но они остаются в воздушном потоке из-за его турбулентности или срыва частиц со стенок вихрем.

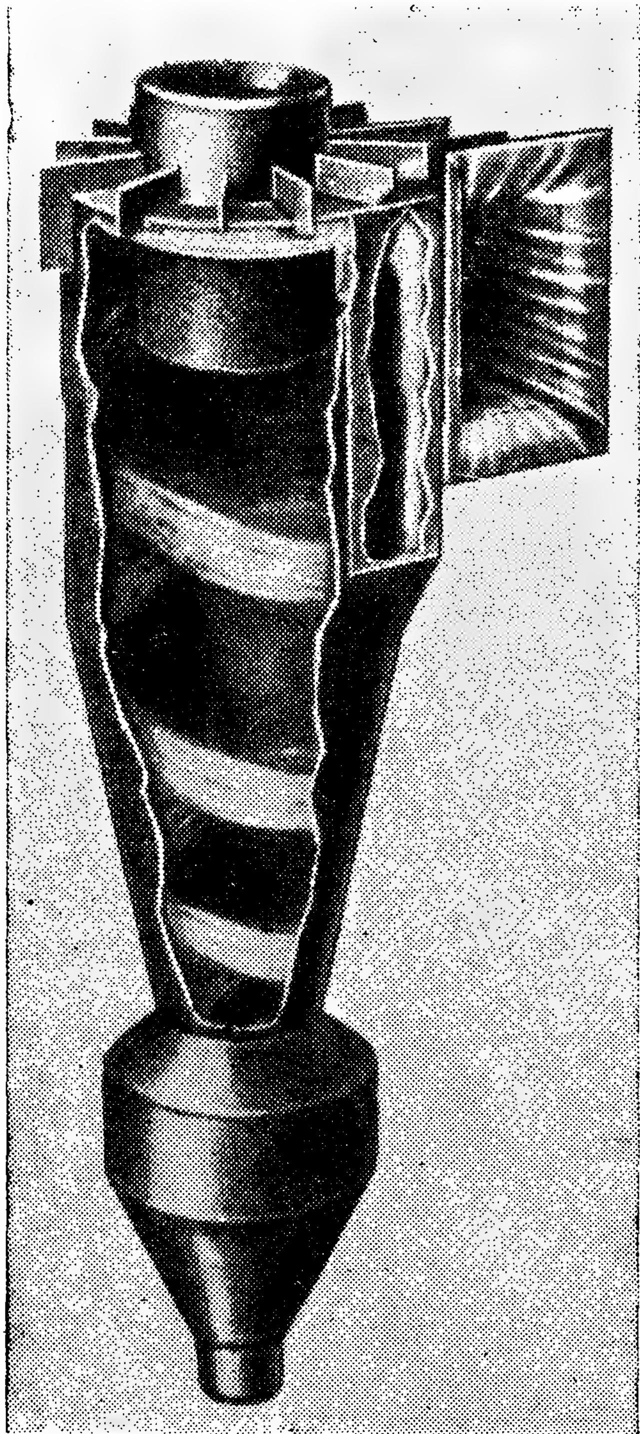


Рис. 7.4. Циклон.

При разработке конструкций циклонов необходимо исходить из следующих условий:

1) радиальное расстояние, которое должна пройти частица до осаждения, должно быть, по возможности, наименьшим;

2) для увеличения центробежной силы кривизна газового вихря должна быть как можно меньше, а скорость потока должна быть оптимально большой;

3) для увеличения длительности процесса осаждения общая длина спирального пути частицы должна быть значительной.

Таким образом, циклоны с длинным конусом и небольшим диаметром должны быть лучше одного большого. Сейчас такие циклоны считаются «высокоэффективными». Циклоны малого диаметра обычно размещаются в общем корпусе (рис. 7.6), что позволяет создавать общий вход в нагнетательную камеру, один пылевой бункер и общий выход из камеры.

При определенных энергетических затратах батарейные циклоны обладают не только более высокой эффективностью, но и другими практическими преимуществами: 1) можно изменять число элементов и расход газа, что ведет к созданию оптимального режима их работы; 2) в небольших аппаратах турбулентность и завихрения минимальны, что улучшает кривую фракционной эффективности (рис. 7.7) [7].

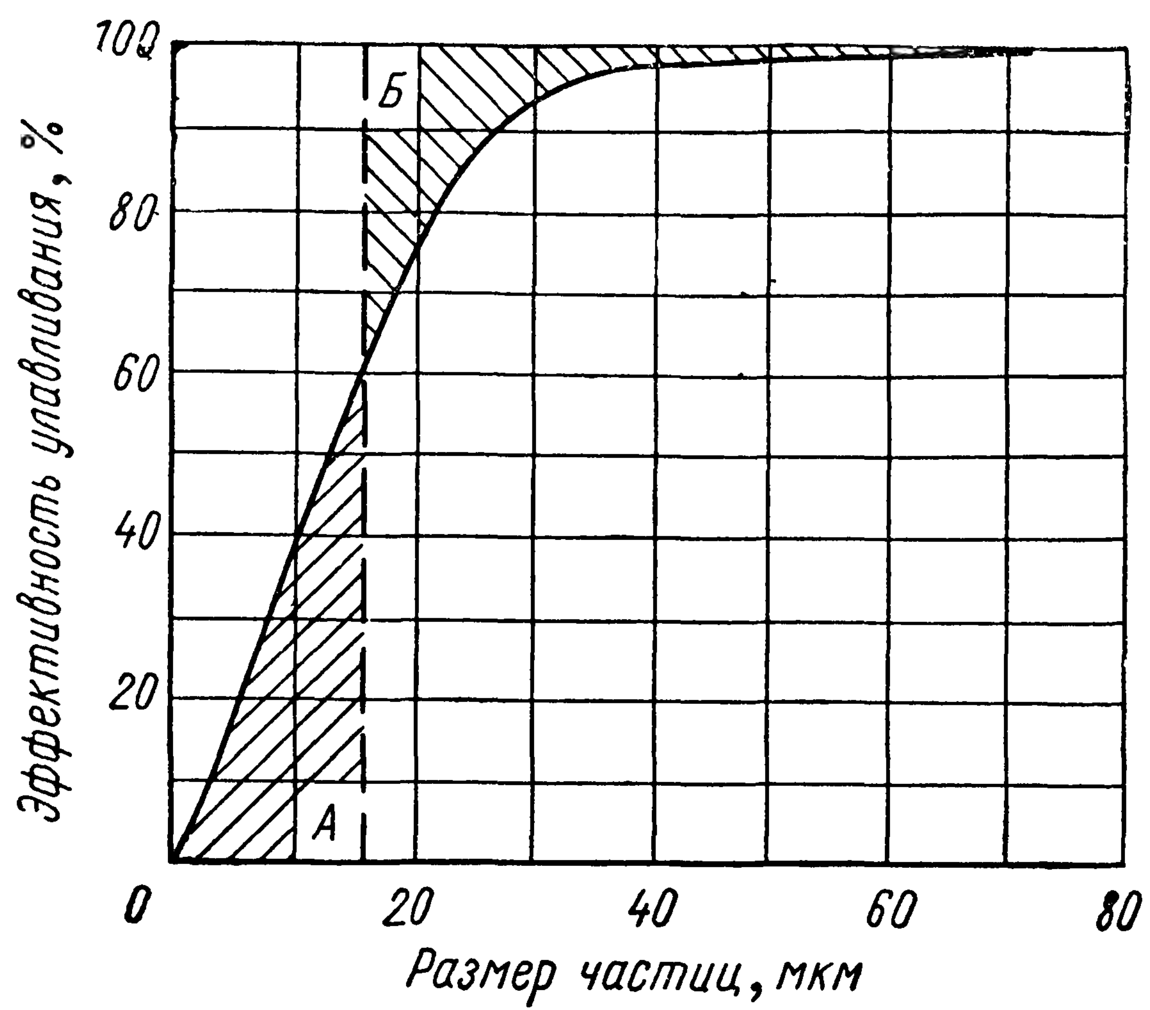


Рис. 7.5. Кривая фракционной эффективности циклона.

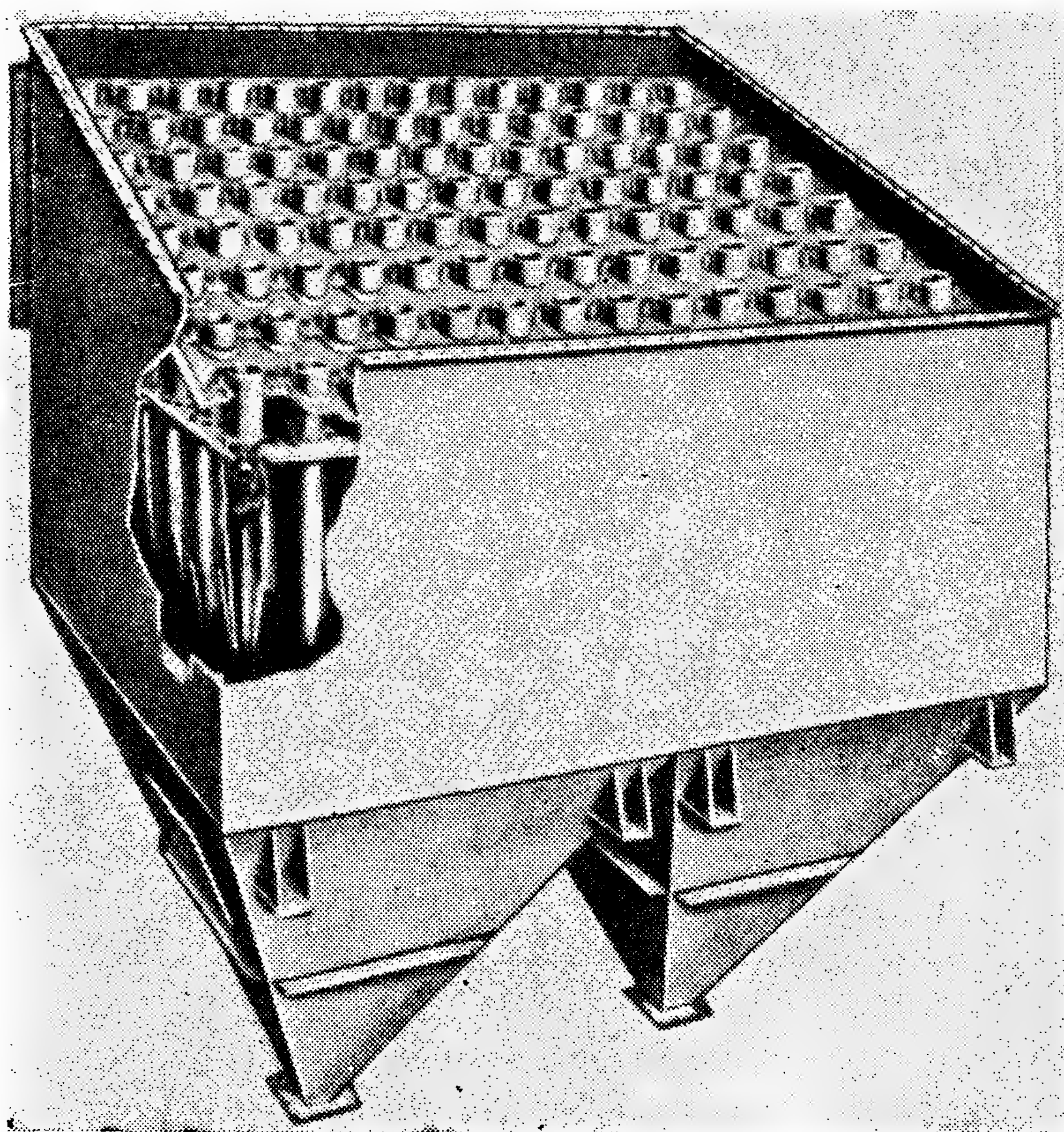


Рис. 7.6. Батарейный циклон, состоящий из высокоэффективных элементов с малыми диаметрами.

Однако многоэлементные системы имеют и недостатки, например неравномерное распределение газа и пыли по циклонным элементам, возможность их забивания пылью в работе. Таким образом, слишком малых размеров следует избегать.

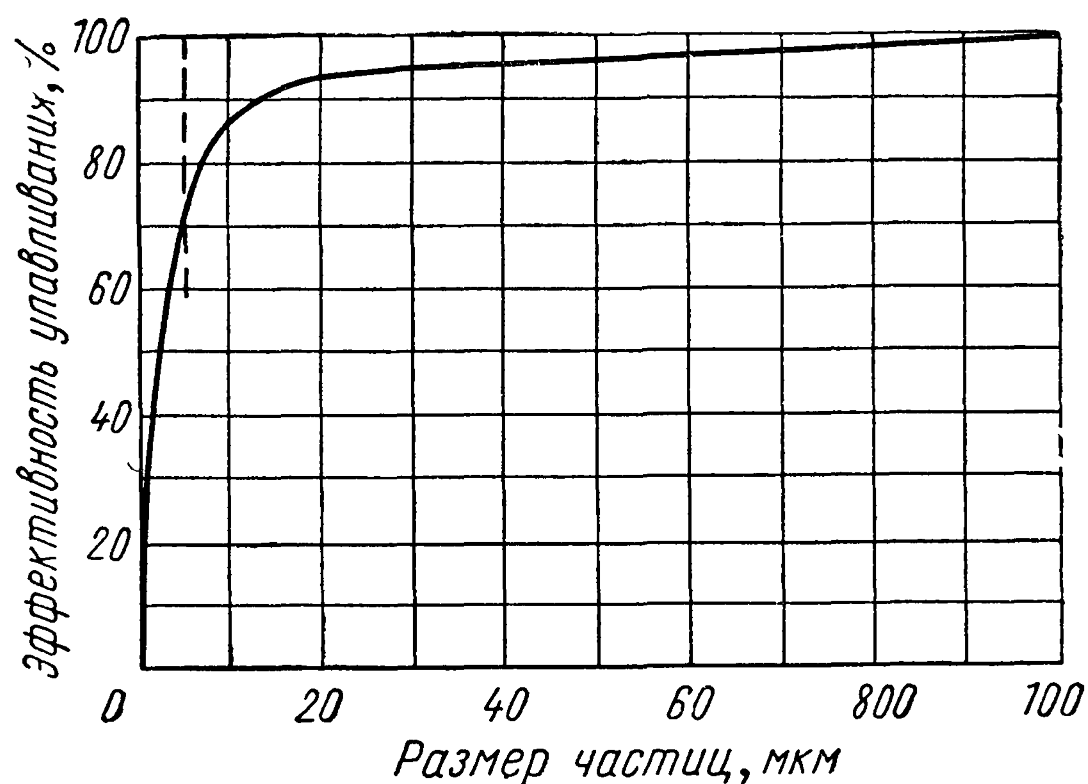


Рис. 7.7. Кривая фракционной эффективности высокоэффективного циклона с длинным конусом.

Эффективность циклонов можно повысить, если по их стенкам будет непрерывно стекать непрерывная пленка жидкости (рис. 7.8).

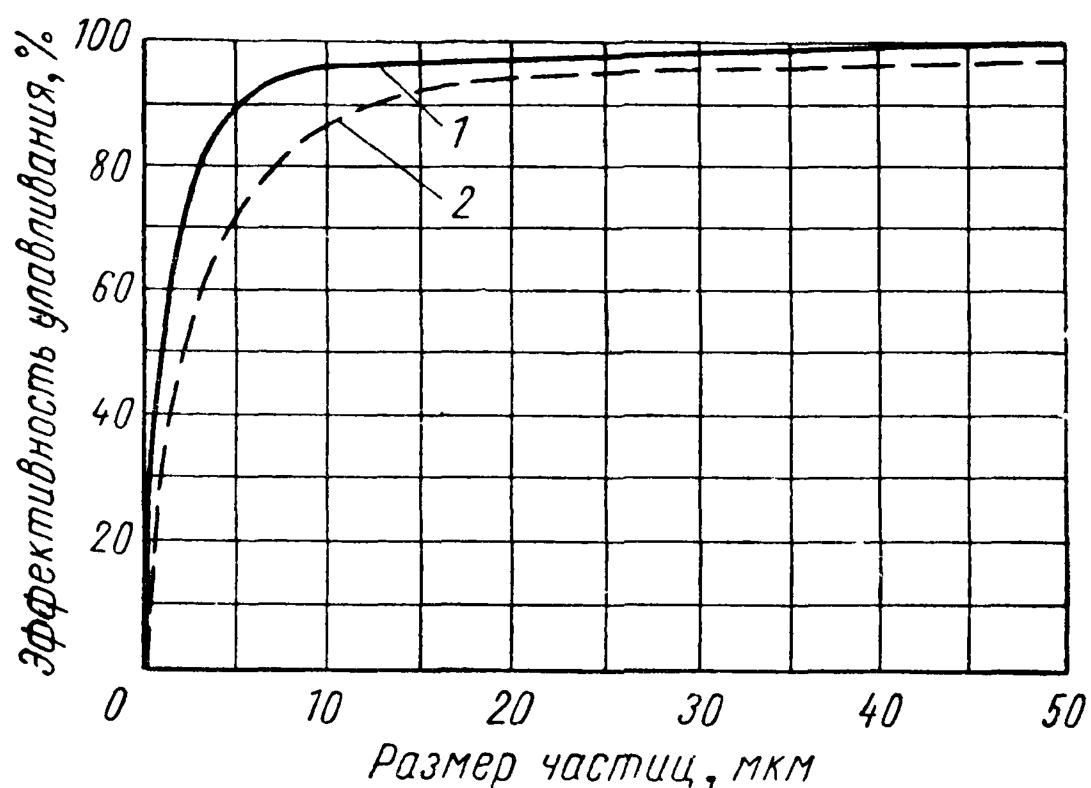


Рис. 7.8. Кривые фракционной эффективности:
1 — мокрого циклона большого диаметра; *2* — сухого циклона.

Стейерменд [2] считает, что для этого достаточно установить простое кольцо с отверстиями в верхней части циклона. Мокрые циклоны, однако, обладают недостатком, общим для всех мокрых пылеуловителей: они интенсивно корродируют. Кроме того, возникают проблемы размещения загрязненной воды и очистки газа, который

из циклона выходит влажным, что может воздействовать на конечную ступень очистки от пыли.

Эффективность циклонов возрастает с увеличением концентрации пыли, и практически не существует верхнего предела концентраций, при котором циклон плохо работал бы [3]. Однако концентрация пыли в газе за циклоном при больших входных запыленностях остается более высокой, чем при работе с более низкой входной концентрацией.

Несмотря на все попытки увеличить степень улавливания пыли в циклонах, они, как правило, не дают эффективностей более высоких, чем те, что приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Эффективность циклонов

Предельный размер частиц, *мкм*	Предельная эффективность улавливания пыли, вес. %	
	Обычные циклоны	Высокоэффективные циклоны
<5	<50	50—80
5—20	50—80	80—95
15—40	80—95	95—99
>40	95—99	95—99

Сопротивление. Величины перепадов давления на циклонах лежат в пределах от 25 до 180 *мм вод. ст.* [8].

Величина перепада давления возрастает пропорционально квадрату входной скорости. Аналогичным образом скорость влияет на эффективность. Однако все попытки снизить сопротивление обычно приводят также к уменьшению эффективности, за исключением тех случаев, когда это достигается за счет выравнивания потока в циклоне и на выходе из него; высокие запыленности газа, приводящие к снижению сопротивления, повышают эффективность.

По-видимому, циклоны в качестве предварительных пылеуловителей используются наиболее широко. Их преимуществами являются простота конструкции и надежность работы, отсутствие подвижных частей. Все это особенно важно при работе с опасными веществами. Однако в установках с высокоэффективными фильтрами между циклонами и фильтрами тонкой очистки необходимо помещать устройства для дополнительной обработки газа, такие, как грубоволокнистые фильтры, успешно использующиеся в качестве предфильтров при улавливании пылей механического происхождения.

Мокрое пылеулавливание

Во всех промывателях должен обеспечиваться хороший контакт пылевых частиц с поверхностью жидкости за счет эффектов инерции, зацепления или диффузии; удаление частиц после их контакта

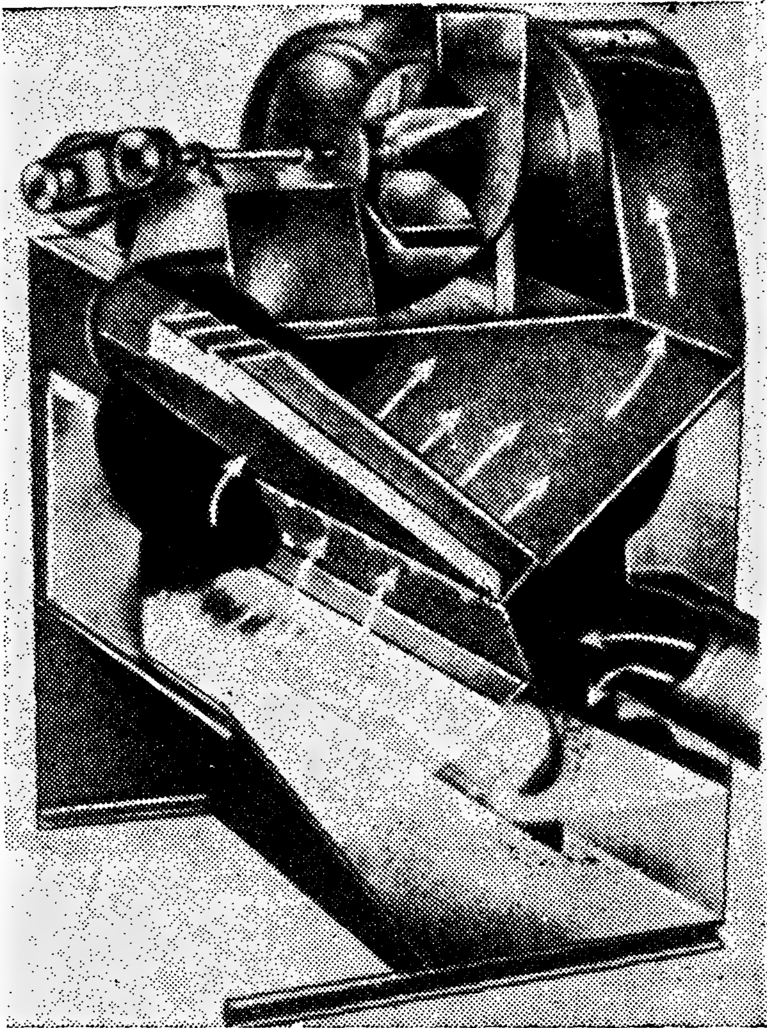


Рис. 7.9 «Ротоклон» типа *N*.

осуществляется относительно легко, так как они становятся частью потока жидкости или смоченные частицы становятся настолько большими, что легко улавливаются в относительно простых аппаратах, например циклонах. Жидкая поверхность контакта может быть в виде пленки (скрубберы с насадкой), пузырьков (барботажные скрубберы с решетками) или капель (форсуночные скрубберы, газопромыватели Вентури). Во многих промышленных мокрых пылеуловителях эти принципы совмещаются.

На рис. 7.9 показан пылеуловитель, в котором замкнутое самоорошение, побуждающее распыл, сочетается с пленочным движением воды. Запыленный воздух проходит между перегородкой и водой и образует завесу из капель, которую газ сначала прорывает, а затем контактирует вместе с унесенными каплями с мокрой поверхностью брызгоотбойника (рис. 7.10).

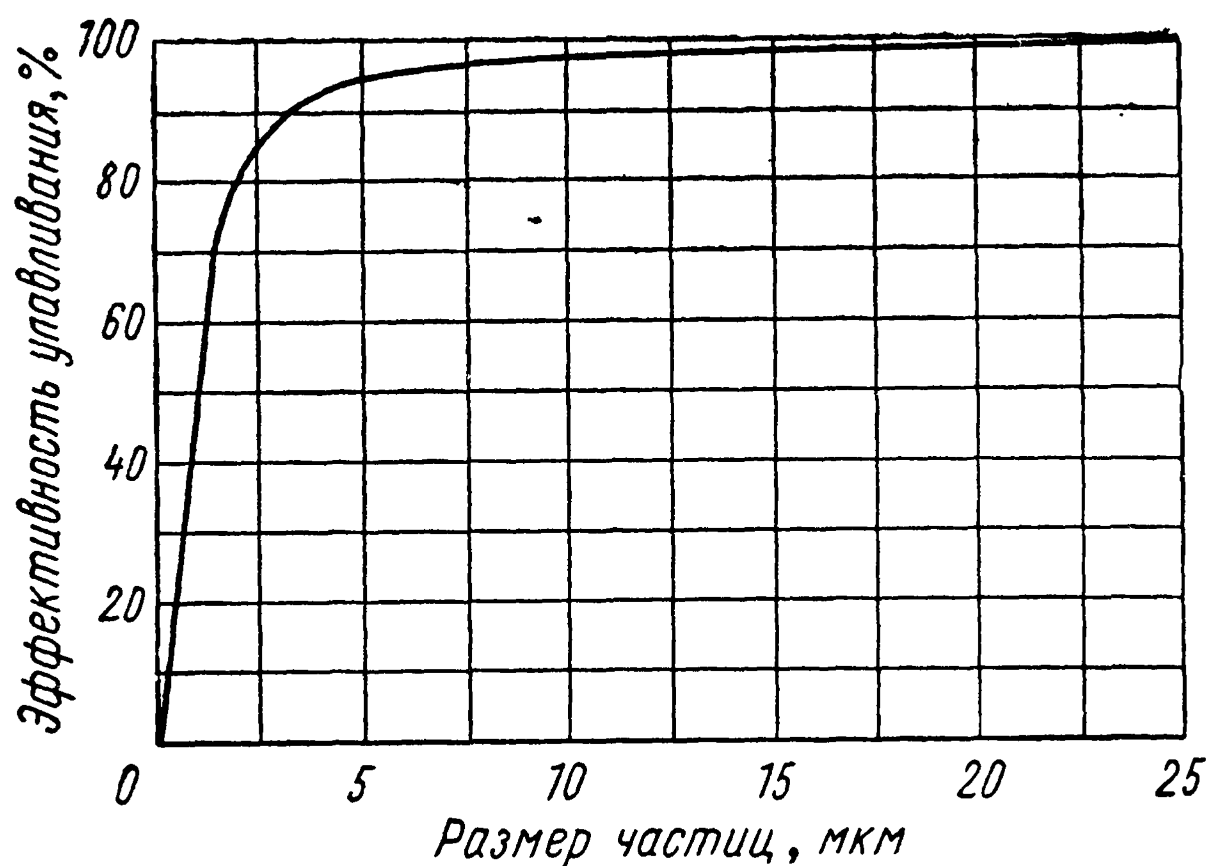


Рис. 7.10. Кривая фракционной эффективности «Ротоклона» типа *N*.

В скруббере Пиз-Антони эффект капельного орошения сочетается со спиральным движением газа (рис. 7.11). К сожалению, такой аппарат имеет большое сопротивление.

Типичные характеристики скрубберов приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Характеристики промышленных скрубберов

Тип	Входная запыленность, $г/м^3$	Медианный размер частиц на входе, *мкм*		Эффективность улавливания, вес. %
		весовой	счетный	
Механический, центробежный . . .	16,8	43	1	99,6
	2,53	45	—	97,2
Инерционный (см. рис. 7.9)	0,0138	1	0,6	64,5
	1,15	25	1	76,0
Форсуночный скруббер с тангенциальным входом	2,3	0,1	0,3	75
	8,27	4	2	92
	0,0115	—	—	85

Промыватель Вентури. Мокрый пылеуловитель такого типа может обеспечивать наиболее высокоэффективное улавливание очень мелких частиц. Он состоит главным образом из труб переменного сечения, обеспечивающих сужение газового потока, и устройств для введения водных струй в горловину или перед ней. Поток газов, идущий со скоростью 60—90 *м/сек*, распыляет воду, а высокая скорость частиц пыли по отношению к образующимся каплям обеспечивает высокую эффективность их улавливания за счет соударений с каплями. Укрупненные таким образом частицы легко улавливаются в циклонах или других брызгоуловителях (рис. 7.12).

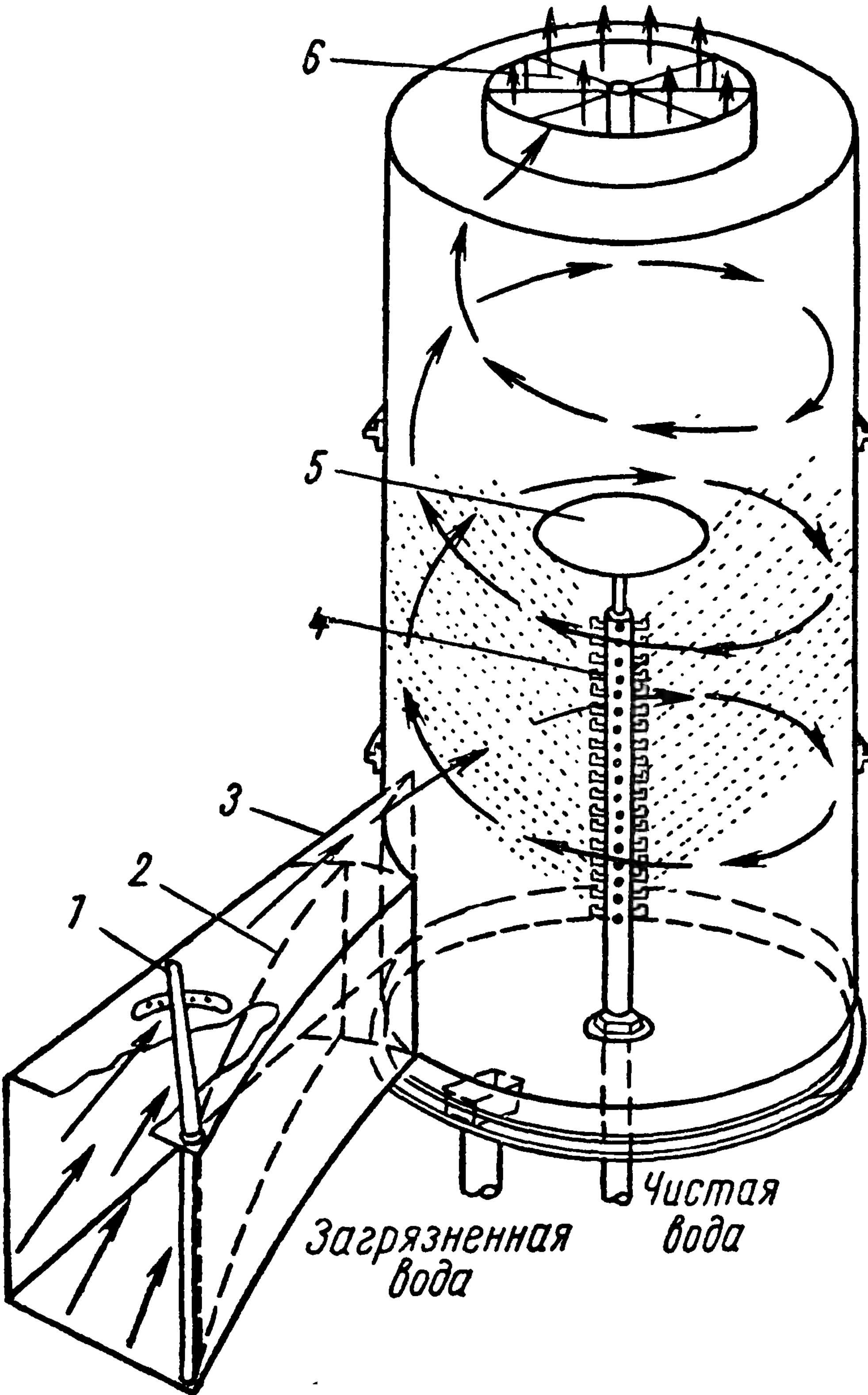


Рис. 7.11. Циклонный скруббер «Пиз-Антони»:

1 — рукоятка; *2* — поворотная заслонка на входе; *3* — тангенциальный ввод газа; *4* — система орошения; *5* — центральный отражательный диск; *6* — лопатки, выравнивающие поток.

Обычная кривая фракционной эффективности такого скруббера приведена на рис. 7.13, из которой следует, что эффективность улавливания частиц размером более 2 *мкм* достигает 100%. Высокая величина эффективности затрудняет на практике определение его точных рабочих характеристик. В работе [9] приведено значение эффективности улавливания возгонов окиси бария, имеющих частицы размером около 1 *мкм*, равное 99,98%.

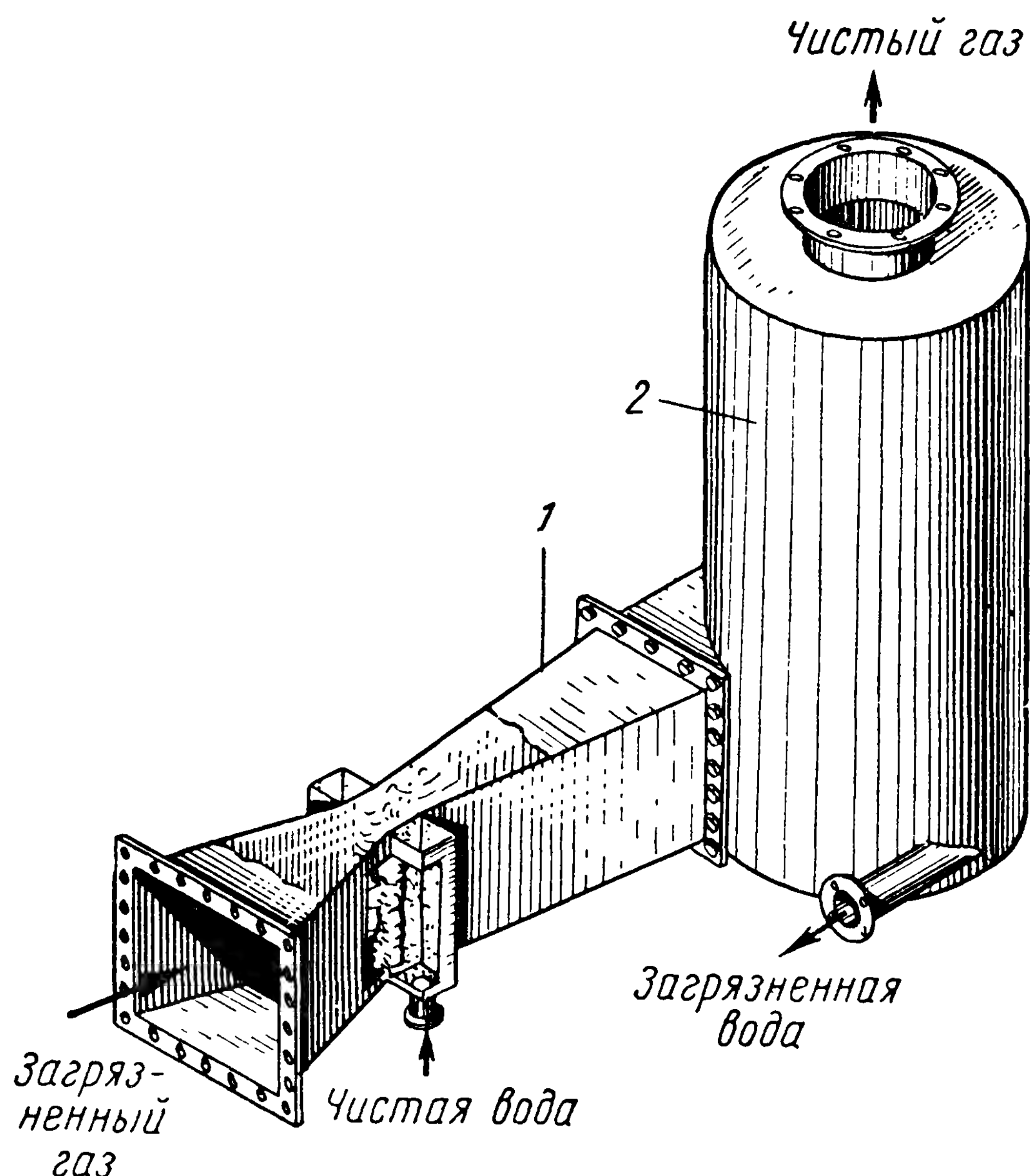


Рис. 7.12. Скруббер Вентури:
1—труба Вентури; *2*—циклонный брызгоуловитель.

Недостатком простейшего скруббера Вентури является то, что требуются большие энергетические затраты; потеря давления порядка 635—700 *мм вод. ст.* для него обычна.

Было проведено несколько работ, в которых пытались снизить сопротивление или улучшить эффективность улавливания. Работы вели в разных направлениях.

1. Водяную струю вводили непосредственно перед трубой Вентури. Это привело к образованию более мелких капель в горловине и к большей разнице между скоростями частиц и капель.

2. Запыленный газ перед поступлением в трубу Вентури специально подготавливали путем насыщения парами воды; в горловине трубы из-за пониженного статического давления происходила конденсация паров воды на частицах пыли и их укрупнение. Образованный таким образом «туман» улавливался далее каплями. Сообщалось, что многоступенчатые трубы Вентури такого типа обеспечивали эффективность улавливания частиц размером 0,3 *мкм* на

99,9%, хотя перепад давления на одной ступени составлял всего 25 *мм вод. ст.* [4].

3. Вводили в трубу Вентури тонкораспыленную воду. Это улучшало эффективность улавливания и снижало потери давления.

Однако, по данным Леппла и Кемека [10], нельзя ожидать повышения эффективности с одновременным уменьшением сопротивления. Также следует учитывать, что тонкое распыление воды связано с большими затратами энергии. Кроме того, мельчайшие капельки с уловленными частицами пыли после прохождения трубы Вентури должны быть уловлены; очевидно, нельзя ожидать высокой общей эффективности, если водяные капли не будут значительно крупнее частиц пыли.

Дальнейшие исследования влияния различных параметров (размеры капель, условия конденсации, конструкции труб Вентури, размеры частиц, величина концентрации) на эффективность улавливания пыли представляют большой интерес. Весьма интересно также тщательное изучение механизмов контактирования в зоне орошения трубы Вентури.

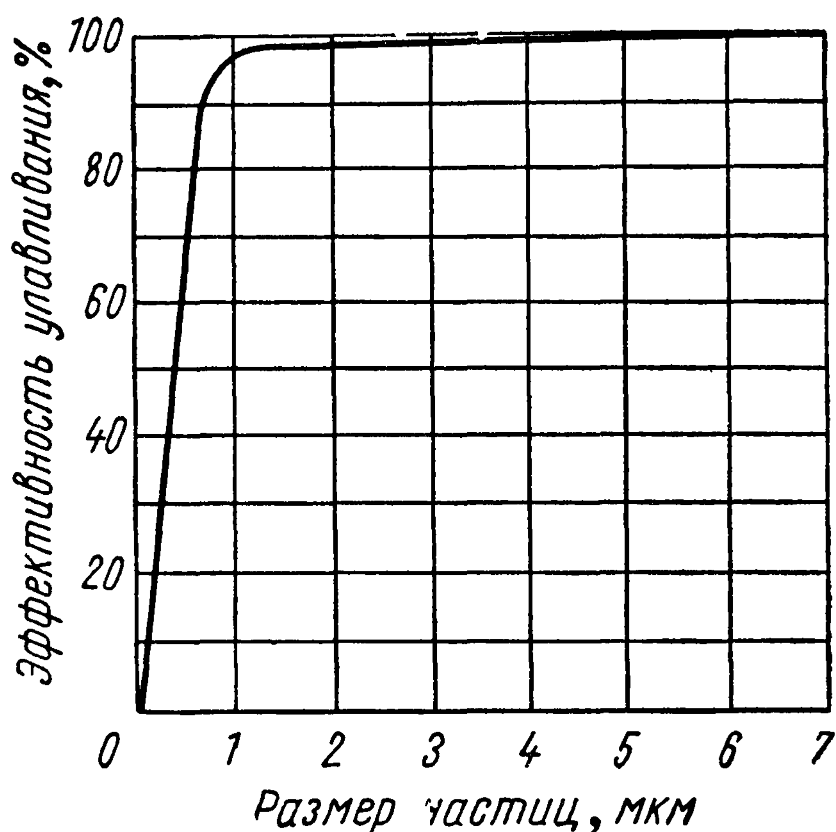


Рис. 7.13. Кривая фракционной эффективности скруббера Вентури.

Трубы Вентури заслуживают весьма обстоятельных исследований с точки зрения перспектив их использования для высокоэффективного улавливания тонких частиц. Вероятно, их можно использовать не только в качестве предварительных пылеуловителей. На ряде операций с низкими входными концентрациями их можно применять для улавливания основной массы пыли с малыми размерами частиц. В этом случае можно было бы меньше внимания уделять предварительной очистке приточного воздуха, поступающего в производственные помещения, и устанавливать только высокоэффективные фильтры, срок службы которых из-за низкой пылевой нагрузки будет более продолжительным.

Скрубберы Вентури обладают большими преимуществами: они очень просты по конструкции, не имеют подвижных частей, уловленная пыль непрерывно удаляется в виде легко перерабатываемого и легко транспортируемого шлама. Их недостатком является образование мокрых выбросов, вызывающих в системах фильтрации коррозию. При охлаждении в этих выбросах образуются капли, которые выпадают при выходе из выбросной трубы. Перерыв в подаче энергии и другие неисправности в системе орошения могут привести к полной потере эффективности улавливания пыли.

ЭЛЕКТРОФИЛЬТРЫ

Частицы пыли в электрофильтрах осаждаются при пропускании запыленного газа между парами электродов: коронирующим электродом, обычно имеющим форму тонкого провода и находящимся под отрицательным напряжением 40—50 *кв*, и заземленным осадительным электродом. Разность потенциалов должна быть достаточной

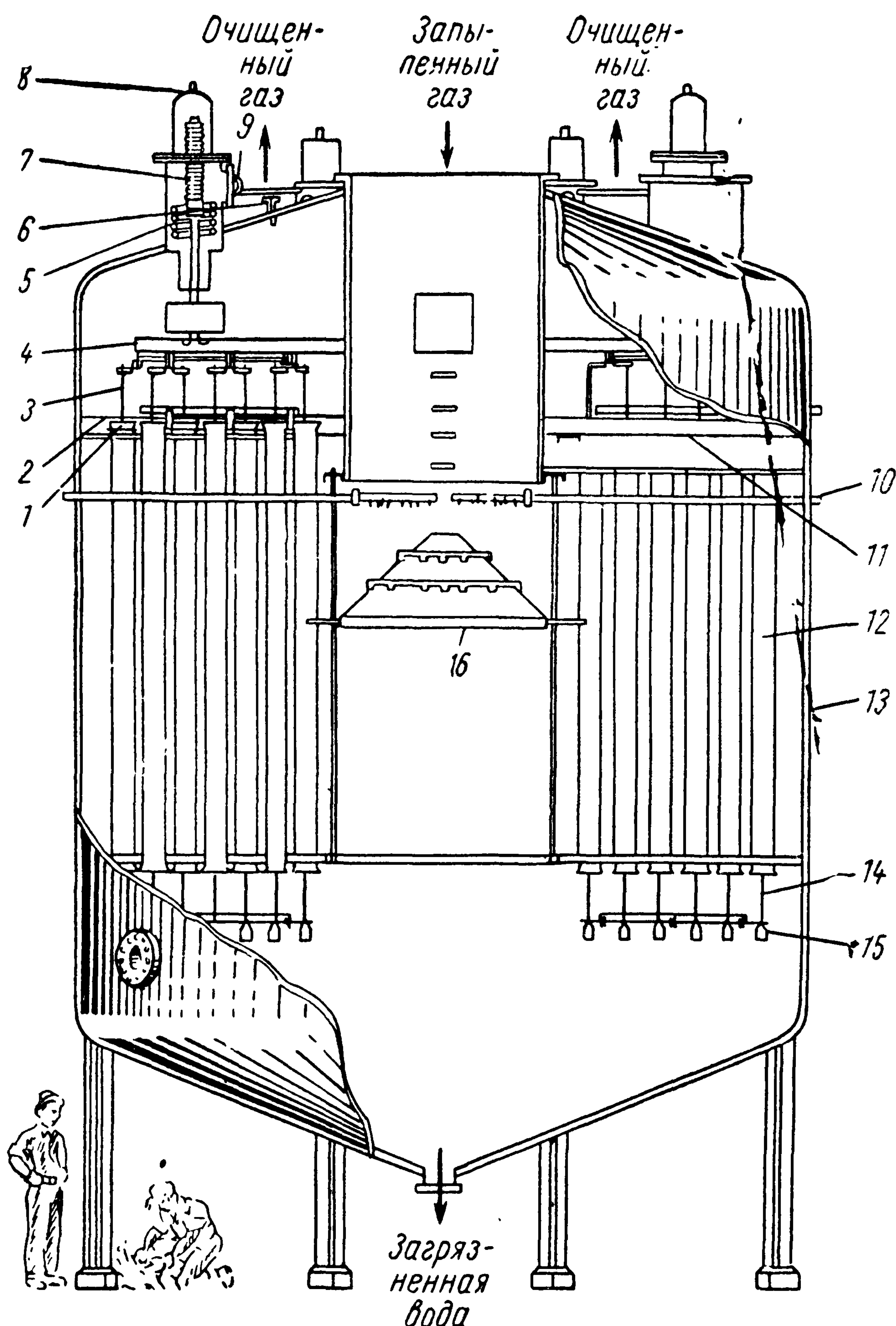


Рис. 7.14. Трубчатый электрофильтр:

1 — регулируемые переливные кольца-насадки; *2* — сборник воды; *3* — коронирующие электроды; *4* — рама подвеса коронирующих электродов; *5* — нагревательный элемент (паровой змеевик); *6* — подвесное брызгало периодической промывки электродов; *7* — опорные обогреваемые изоляторы; *8* — изоляторные коробки высокого напряжения; *9* — люки; *10* — коллектор питания водой для промывки труб и отражательных конусов; *11* — днище водосборника; *12* — осадительные трубчатые электроды; *13* — корпус; *14* — коронирующие электроды; *15* — грузы на электродах; *16* — газоотражательный конус.

для образования коронного разряда около коронирующего электрода, что приводит к образованию газовых ионов, движущихся от коронирующего электрода к осадительному и заряжающих частицы пыли. Заряженные частицы под действием электрического поля движутся в основном к осадительному электроду и осаждаются на нем. Частицы, осевшие на электроде, образуют слой агрегированной пыли, который можно удалить, встряхивая электроды через определенные интервалы времени или смывая водой.

В промышленности используются два типа электрофильтров: трубчатые (рис. 7.14) и пластинчатые, различающиеся конфигурацией осадительных электродов.

Двухзонные электрофильтры (электрофильтры с предварительной ионизацией) пригодны для очистки воздуха с низкой концентрацией пыли. Они могут использоваться как предфильтры в схемах высокоэффективной фильтрации. В таких электрофильтрах зона ионизации отделена от зоны осаждения, что приводит к уменьшению размеров аппаратов и уменьшению расхода энергии.

В мокрых электрофильтрах, в которых вода смывает осадок пыли с электродов, эффективность значительно больше, чем в сухих. В горизонтальных орошаемых форсунками электрофильтрах, описанных Паркингтоном и Лаури-Уокером [11], особенно малые промежутки между осадительными и коронирующими электродами; необходимое напряжение 15 *кв*.

Эффективность осаждения

Уравнение для определения эффективности осаждения, полученное эмпирически Андерсоном в 1919 г. и теоретически Дейчем в 1922 г. и недавно уточненное Роузом и Вудом [12], может быть записано в виде

$$\eta = 100\left(1 - e^{(A_s W/Q)}\right), \qquad (7.1)$$

где η — эффективность; A_s — общая площадь осаждения; W — скорость дрейфа частицы; Q — объемная скорость газа.

В электрофильтрах происходит интенсивное турбулентное перемешивание потока в связи с высокими значениями чисел Re и в результате действия электрического ветра.

Скорость дрейфа заряженных частиц очень быстро достигает предельной величины. С учетом закона Стокса она может быть вычислена по формуле

$$W = \frac{pDE^2}{36 \cdot 10^7 \pi\mu}\left(1 + \frac{J\lambda}{D}\right), \qquad (7.2)$$

где $p = \frac{3\xi}{\xi + 2}$ (ξ — диэлектрическая постоянная); D — диаметр частиц (при $D > 1$ *мкм*); E — напряженность электрического поля; μ — вязкость газа; $J = 1{,}764 + 0{,}562e^{-0{,}785D/\lambda}$; λ — средняя длина пути свободного пробега молекул.

С помощью этих уравнений можно рассчитать эффективность осаждения частиц различных диаметров.

Стейерменд [2], сравнив рассчитанные и опытные результаты (рис. 7.15), пришел к выводу, что эти уравнения могут служить только для учета влияния изменений в работе данной установки, но не могут быть основой для расчета конструкций. На практике целесообразно проводить предварительные испытания опытной установки, когда трудно получить требуемые результаты на уже действующих устройствах.

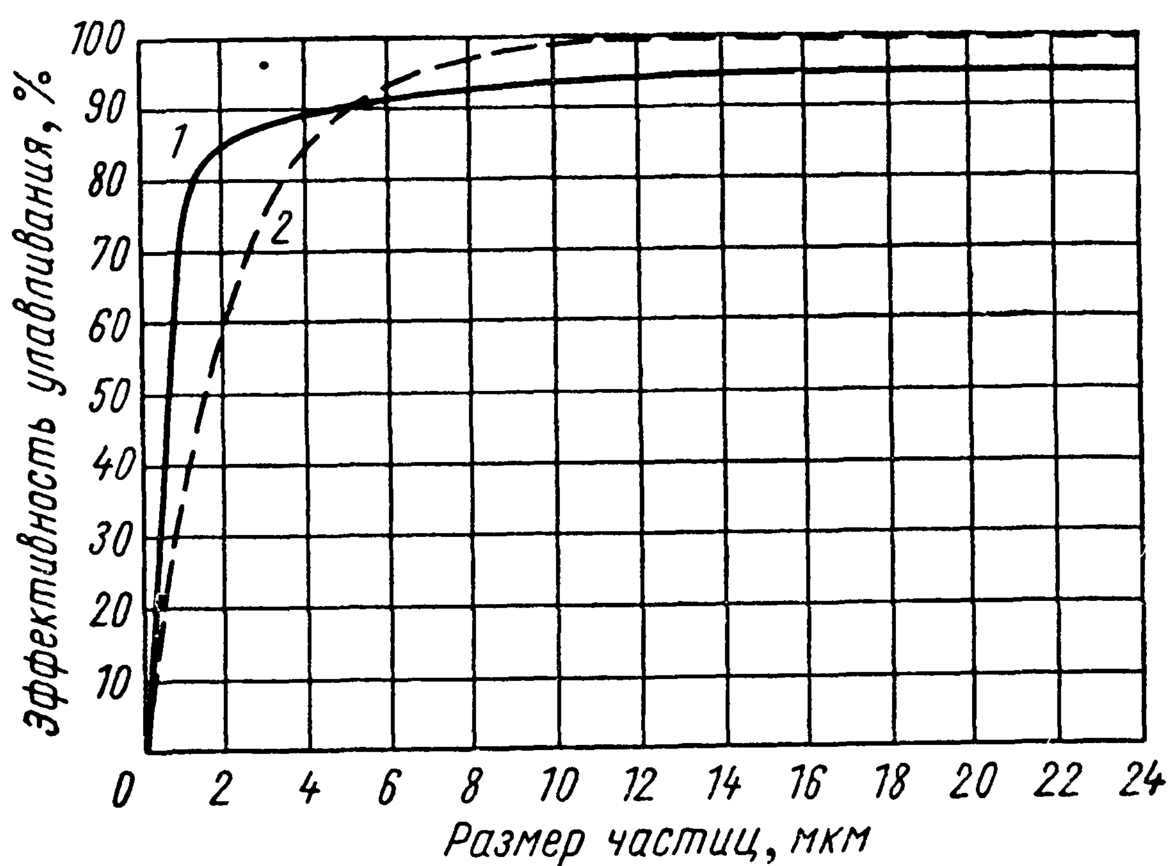


Рис. 7.15. Кривая фракционной эффективности электрофильтра:
1—экспериментальная кривая; *2*—теоретическая кривая.

Несмотря на то что теоретически нет низшего предела для размеров частиц, которые не могли бы осаждаться в электрофильтрах, эффективных аппаратов для улавливания очень мелких частиц в настоящее время нет.

Удаление пыли. Накопившуюся на электродах пыль через определенные промежутки времени необходимо удалять, не допуская при этом снижения эффективности очистки. Наиболее часто применяется встряхивание или обстукивание электродов. Система встряхивания обычно рассчитана на группу электродов, соединенных штангой, по которой периодически наносятся удары механическим, электромагнитным или пневматическим устройством. Иногда слой пыли соскребают цепями. В некоторых случаях применяют высокоскоростные воздушные ударные волны. В мокрых трубчатых аппаратах слой пыли смывается пленкой воды. При удалении пыли не должно происходить взмучивания пыли.

Удалять пыль следует по возможности редко, чтобы уловленные частицы успевали агломерировать и чтобы не было вторичного уноса [13].

Форма осадительных электродов. В современных конструкциях электрофильтров необходимо усовершенствовать осадительные электроды.

Помимо обычных требований простоты изготовления, низкой стоимости, механической прочности и жесткости, желательно, чтобы они имели форму, исключающую образование мертвых зон, и обеспечивали бы «тихие» зоны, с которых можно удалять пыль, не вызывая вторичного уноса. Эти электроды должны давать также максимальные электрические поля, в которых нет острых граней и углов. Этим требованиям отвечают электроды, имеющие форму тюльпана.

Естественная пыль и ее кондиционирование. Электрическое сопротивление пыли является важным параметром, который определяет удерживание пыли на электродах. Если сопротивление меньше 10^4 *ом·см* (сажа, уголь), то частицы пыли могут отталкиваться от электродов. Если сопротивление больше $2\cdot10^{10}$ *ом·см*, то заряды не будут стекать с пыли. Образуется обратная корона, которая будет препятствовать дальнейшему осаждению. Осаждение некоторых пылей с сопротивлением выше 10^{10} *ом·см* можно улучшить снижением температуры ниже 100° С, проводя впрыскивание воды для увеличения проводимости, или повышением температуры, если при этом уменьшается сопротивление. На практике разбрызгивание воды или введение пара для образования проводящего слоя частиц часто является методом уменьшения высокоомного сопротивления пыли. Для пылей, которые плохо адсорбируют воду, в этих случаях применяются пары серного ангидрида или аммиака [14].

Электрофильтры используются для предварительного осаждения пыли перед высокоэффективными фильтрами. Они особенно удобны, потому что могут иметь значительную эффективность осаждения даже мелких частиц. Кроме того, они хорошо работают при низких концентрациях пыли (табл. 7.4). Пенроуз [15] описал работу двухзонного электрофильтра при этих условиях.

Таблица 7.4

Типичные характеристики работы электрофильтров

Тип электрофильтра	Входная концентрация, *г/м³*	Медианный весовой размер частиц, *мкм*	Эффективность, %
Однозонный	0,092	0,3	99,9
	1,38	1,9	97,9
	82,3	—	99,83
Двухзонный	0,092	0,3	99,99
	4,6	0,25÷50	90,0

Основной недостаток электрофильтров — их ненадежность: уменьшение эффективности может происходить при отключении напряжения в случае пробоев, при вторичном уносе уловленной пыли во время встряхивания, при изменении режимов работы ос-

новного технологического процесса. По этим причинам они нуждаются в квалифицированном обслуживании и постоянном уходе.

Работы Стейерменда и других показали, что можно получить значительный эффект очистки электрофильтрами, если пыли содержат радиоактивные материалы; в первую очередь это относится к двухзонным электрофильтрам. В некоторых случаях α-активный материал улавливается на 100%.

ФИЛЬТРАЦИЯ

Современные фильтры для очистки воздуха и газов можно условно разделить на три типа.

Тканевые фильтры. В этих фильтрах фильтрующие материалы (ткани, фетры и др.) могут использоваться в форме цилиндрических рукавов или плоских рам. Накапливающаяся на фильтрующей поверхности пыль периодически удаляется с помощью различного типа устройств для регенерации. Содержание пыли на входе в эти фильтры может быть 23 *г/м*^{3}. Слой уловленной пыли активно участвует в фильтрации, и после образования такого слоя эффективность фильтра может превышать 99% по частицам с весовым медианным размером 5 *мкм*. Такие фильтры используются главным образом для улавливания промышленных пылей, образующихся при процессах плавления, при дроблении и измельчении руд и при абразивной очистке. Перед ними обычно устанавливаются грубые пылеуловители (циклоны или осадительные камеры).

Волокнистые фильтры промышленного типа. В основе работы этих фильтров лежат принципы, описанные в гл. III. В качестве фильтрующих слоев используются металлические стружки или сетки, разнообразные текстильные и минеральные волокна, которые в некоторых случаях пропитываются различными веществами для увеличения их пылеудерживающей способности. Эти фильтры рассчитаны на работу при концентрациях меньше 10 *мг/м*^{3}. Используются они главным образом в системах кондиционирования воздуха без аппаратов предварительного пылеулавливания. Часто волокнистые фильтры служат предфильтрами перед высокоэффективными фильтрами.

Высокоэффективные фильтры. Эти фильтры отличаются от других волокнистых фильтров размером волокон, их ориентацией и упаковкой, а также толщиной слоя. Все эти параметры выбираются так, чтобы обеспечить высокую эффективность улавливания субмикронных частиц.

Тканевые фильтры

Тканевый фильтр, наиболее широко используемый в промышленности, показан на рис. 7.16. Рукава фильтров обычно делают цельноткаными диаметром 125—500 *мм*, длиной до 9 *м*. Запыленный газ поступает внутрь рукавов таким образом, что более тяжелые час-

тицы осаждаются в бункере, а газ протягивается через тканевые рукава и собирается в общий газоход. Обычно применяются хлопчатобумажные ткани с начесом или гладкие и шерстяные ткани, сукна или фетры в тех случаях, когда в газе имеются пары слабых кислот. В настоящее время расширяется применение синтетических

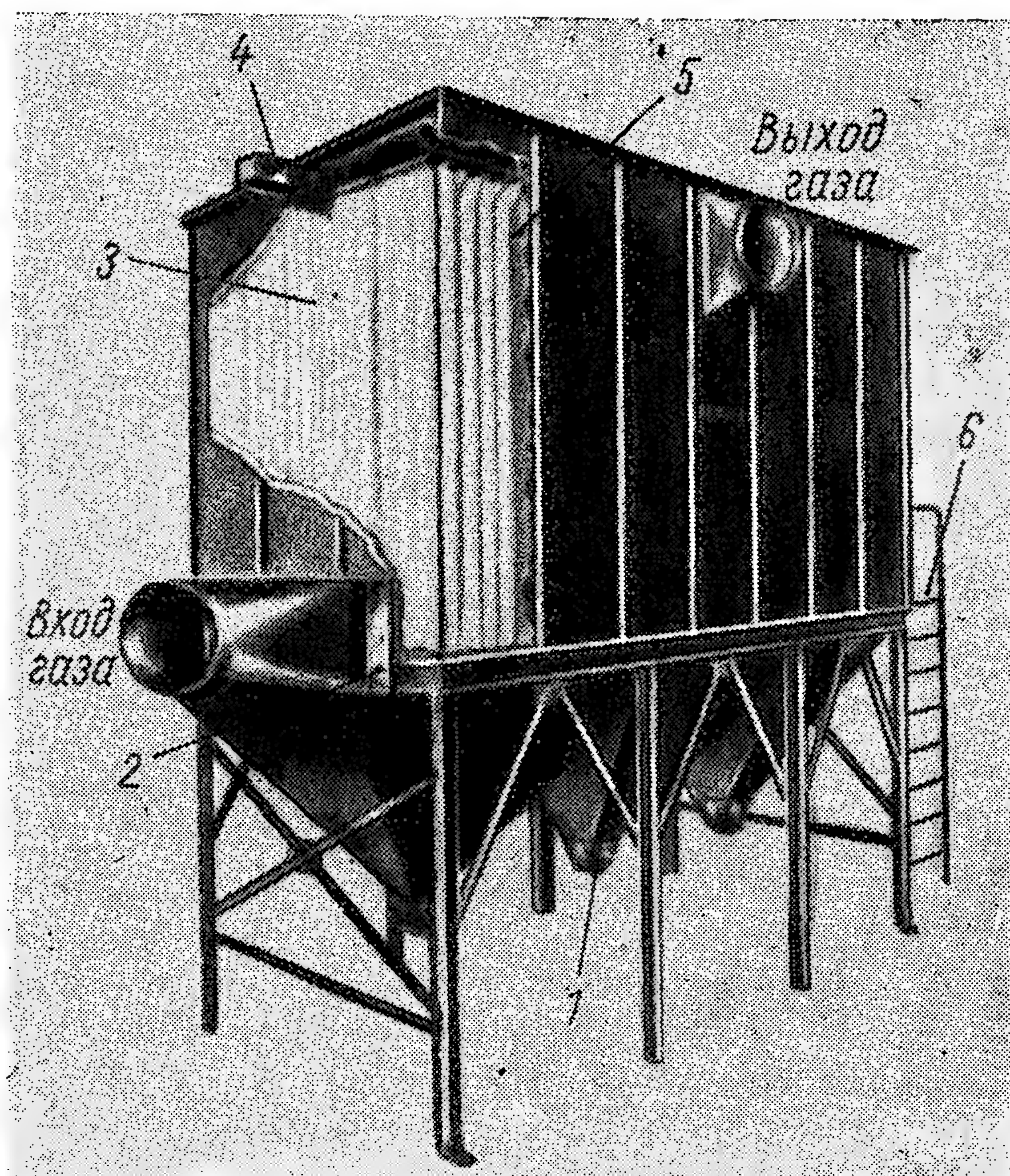


Рис. 7.16. Тканевый фильтр:

1 — пылеразгрузочное устройство; 2 — защитная плита; 3 — проход; 4 — двигатель и приводной механизм; 5 — секция с рукавами; 6 — платформа.

тканей (на основе полиамидных, полиакрилонитрильных и других волокон), а также тканей из стекловолокна, асбеста и металлизированных волокон.

Обычная фильтрующая ткань состоит из нитей основы и утка диаметром порядка 500 *мкм*, расположенных на расстоянии 100—200 *мкм* друг от друга и образующих «сетку» с относительно большими отверстиями, которые частично заполнены тонкими отдельными волокнами диаметром 5—15 *мкм*. Такая среда весьма неэффективна до тех пор, пока на поверхности ткани не образуется пылевой слой (пористостью порядка 80—95%), способный задерживать даже субмикронные частицы. Чтобы не допустить уплотнения пылевого слоя, необходимо работать при низких скоростях фильтрации (0,3—1,8 *м/мин*).

Метод регенерации (или удаления пылевого слоя с ткани) является существенной особенностью конструкций тканевых фильтров с точки зрения обеспечения эффективности улавливания пыли при минимальном сопротивлении и увеличения срока службы ткани. Обычным методом регенерации является встряхивание запыленных рукавов вручную или с помощью электрического и пневматического привода через определенные промежутки времени или по достижении заданного сопротивления фильтра. Одним из методов регенерации является принцип обратной струйной продувки (ру-

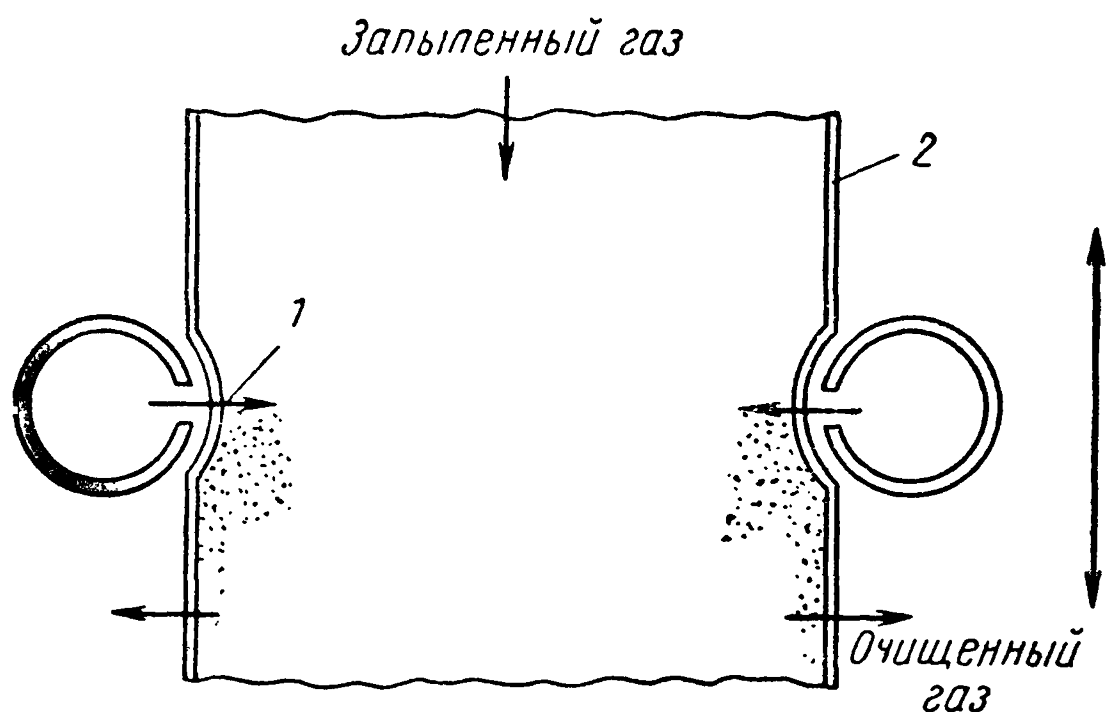


Рис. 7.17. Фильтр с обратной струйной продувкой с движущимися продувочными кольцами:
1 — обратная струя; *2* — фильтрующий рукав.

кавные фильтры Херсея): кольцо со щелью, в которое нагнетается сжатый воздух, медленно перемещается по рукавам вверх и вниз (рис. 7.17). Радиальная струя продувочного воздуха проходит навстречу фильтруемому газу через материал рукава и выдувает пыль, которая падает в бункер. Такое устройство позволяет поддерживать более или менее постоянное сопротивление без отключения секций для регенерации.

Выбор ткани определяется ее термо- и химической стойкостью (табл. 7.5) и свойствами фильтруемой пыли в том смысле, что следует учитывать соотношение электрических зарядов, возникающих при фильтрации на частицах пыли и на материале. Сведения о материалах для различных пылей с этой точки зрения приведены Фредериком [14].

Сопротивление незапыленного тканевого фильтра, равное обычно 50 *мм вод. ст.*, возрастает при эксплуатации до 150 — 200 *мм вод. ст.*

Недавними исследованиями установлено, что нанесение искусственного фильтрующего слоя на поверхность ткани может значительно улучшить эффективность тканевых фильтров, увеличивая таким образом обычный эффект осаждения, зависящий от образования слоя пыли на поверхности [16].

Таблица 7.5

Свойства некоторых фильтрующих материалов

Материал ткани	Химическая стойкость		Максимально допустимая температура газа, °С	Цена, отн. ед.
	в кислотной среде	в щелочной среде		
Хлопок	Плохая	Достаточно хорошая	83	1,0
Шерсть	Хорошая	Плохая	102	2,4
Нейлон	Плохая	Хорошая	107	2,6
Асбест	»	»	135	3,8
Нитрон	Хорошая	Плохая	135	4—5
Стекло (обработанное силиконами)	»	»	260—343	—

Наиболее подходит для этой цели асбест, тонкие волокна которого быстро образуют поперечные «своды» над отверстиями ткани. Получена эффективность свыше 99,9% даже для субмикронных частиц, однако более точных сведений нет.

По опыту автора ожидаемые степени очистки в рукавных фильтрах по пыли с частицами диаметром менее 5 *мкм* на практике не всегда подтверждаются. Для некоторых материалов эффективность по метиленовой голубой составляла 50—60%, хотя ожидали получить до 99%. Необходима дальнейшая проверка тканевых фильтров с использованием современных термостойких материалов и устройств, улучшающих рабочие характеристики фильтров. Их применение в качестве предфильтров весьма перспективно, например, на бериллиевых заводах, где запыленность газов, отсасываемых от дуговых печей плавки и разливочных площадок, относительно высока и весьма желательно возвратить металл в производство.

Волокнистые фильтры промышленного типа

Масляные фильтры. В так называемых масляных (или висциновых) фильтрах волокнистый мат или непрерывная лента из перекрывающихся металлических сеток либо из перфорированных пластин размещается в раме и покрывается слоем липкого масла, удерживающего уловленную пыль. Для регенерации кассетных (ячейковых) фильтров такого типа их разбирают, промывают, смазывают и собирают вновь. Можно создать автоматические самоочищающиеся фильтры (рис. 7.18).

Масляные фильтры применяются для очистки приточного воздуха при высоких концентрациях пыли (до 40 *мг/м*^{3}) и при высоких скоростях воздуха (до 3 *м/сек*), чтобы увеличить осаждение за счет инерционного эффекта. Сопротивление их незначительно, например 3 *мм вод. ст.* в чистом виде и 12 *мм вод. ст.* в забитом фильтре. Если плотность набиваемых волокон увеличивается с лобовой стороны к замыкающей, то на выходе получают низкие концентрации.

Фильтры такого типа обеспечивают эффективность до 85% при улавливании атмосферной пыли, но они едва ли будут эффективными для субмикронных частиц, таких, как в табачном дыме.

Мокрые фильтры. Эти аппараты похожи на масляные фильтры (рис. 7.19). Фильтрующей средой в них служат слои стеклянных или металлических волокон, постоянно смачиваемые водой [17]. Эти фильтры с успехом применяются в тех случаях, когда наряду с улавливанием частиц необходимо обеспечить поглощение пара или газа. А вообще эффективность и сопротивление их почти такие же, как и масляного и сухого фильтров.

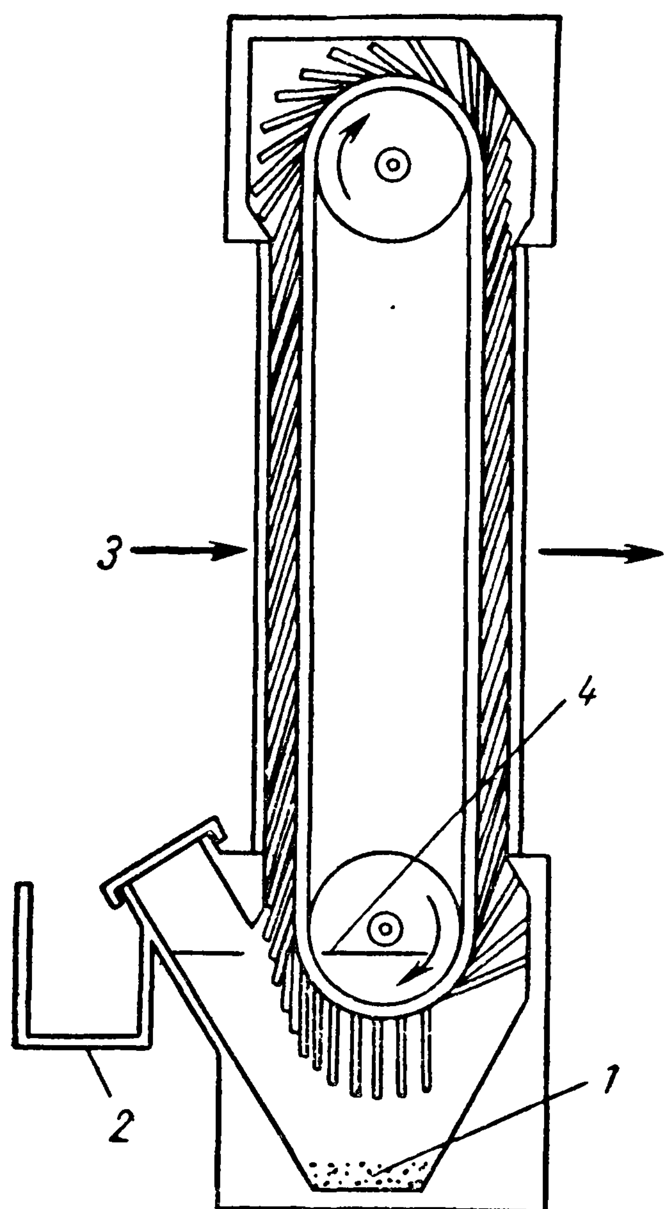


Рис. 7.18. Автоматический масляный фильтр:
1 — шлам; 2 — шламоприемник; 3 — поток газа; 4 — уровень масла.

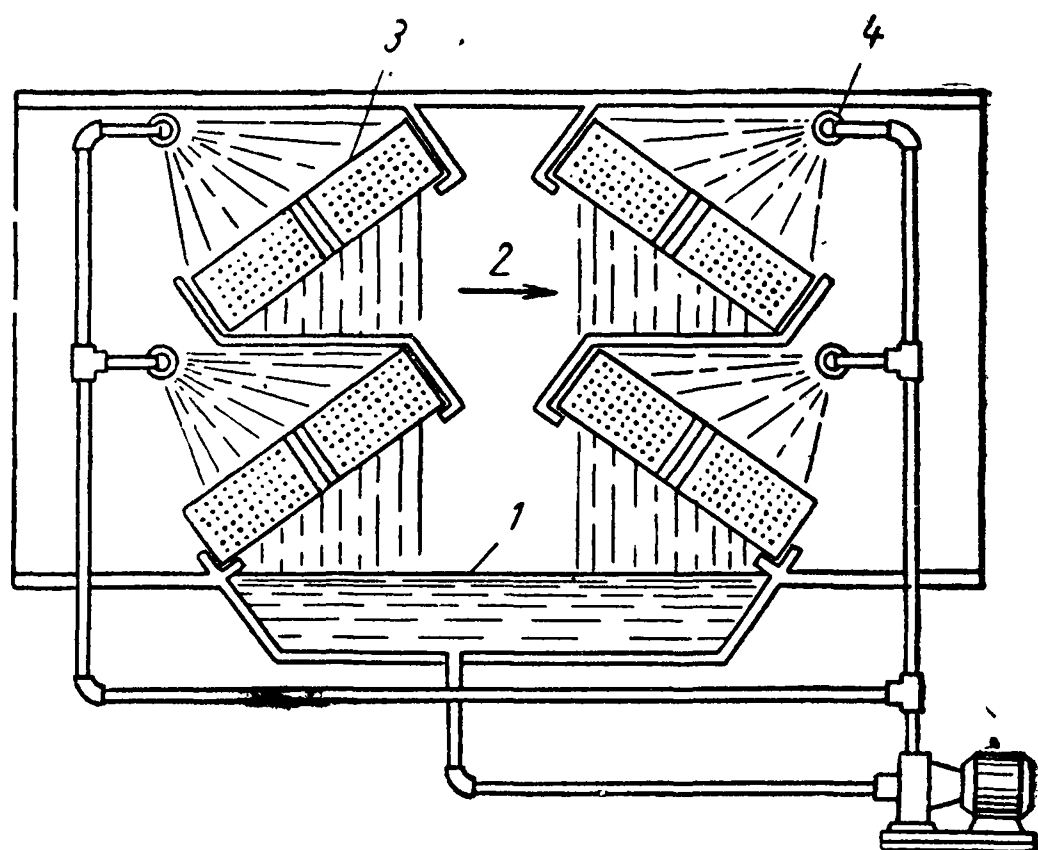


Рис. 7.19. Мокрый волокнистый фильтр:
1 — уровень воды; 2 — поток газа; 3 — фильтрующие ячейки; 4 — оросители.

Сухие фильтры. Подробное описание сухих фильтров, использующих в качестве фильтрующей среды волокнистые слои, бумагу из текстильных волокон или стекловолокнистые маты, дано в других разделах книги. Обычно среда таких фильтров не регенерируется, хотя, по сообщению Биллингса [18], ударная волна может привести к агломерации уловленной пыли, которую можно удалить обратной продувкой небольшим количеством воздуха. Далее загрязненный воздух направляется в циклон.

В качестве сухого волокнистого фильтра предварительной очистки перед высокоэффективными фильтрами можно применять автоматический катушечный фильтр (рис. 7.20).

Электростатические фильтры. В одном промышленном грубоволокнистом фильтре используется наложение электрического поля на фильтрующий мат. Фильтрующий материал укладывается обыч-

ным способом между v-образными опорными решетчатыми рамами и проводами, изолированными от рамы. На металлические провода подается отрицательный потенциал относительно рамы, поэтому волокна фильтрующего материала, являющиеся хорошими диэлектриками, также заряжаются. Отмечается заметное повышение эффективности, особенно при наличии мелких частиц.

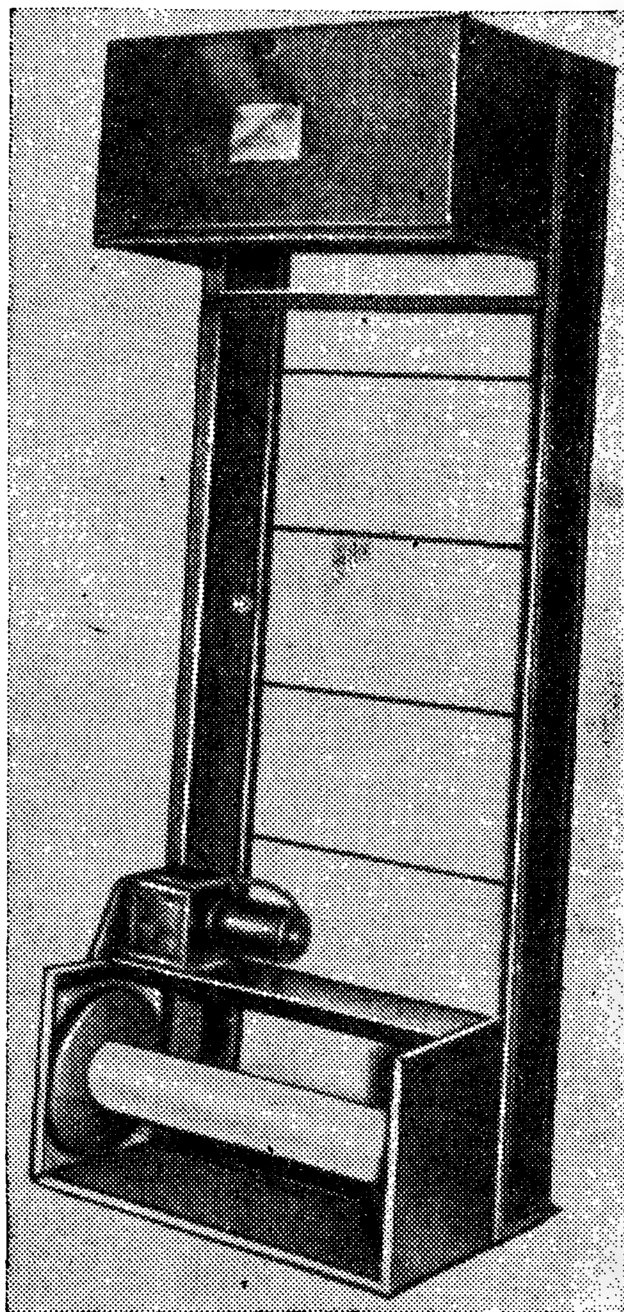


Рис. 7.20. Автоматический катушечный фильтр.

УДАЛЕНИЕ ПАРОВ

Проведение одной высокоэффективной фильтрации не обеспечивает необходимой очистки воздуха при наличии примесей в виде газов или паров, которые не задерживаются механическими фильтрами. В целом ряде промышленных процессов используются газообразные реагенты, в которых концентрацию нежелательных примесей необходимо поддерживать на низком уровне, чтобы избежать побочных реакций, способствующих загрязнению продуктов или вызывающих снижение выхода, а в некоторых случаях — ингибирование или отравление катализаторов. В некоторых случаях необходимо удалить загрязнения, чтобы не допустить создания опасных концентраций в самой установке. Удаление загрязнений из газовых потоков, сбрасываемых в атмосферу, стало обычным широко применяемым промышленным процессом, тем более что развитие санитарной медицины позволило вскрыть связи между возникновением определенных заболеваний и загрязнением атмосферы в производственных помещениях. С развитием атомной промышленности появились специфические проблемы по обработке газообразных сбросов от ядерных установок.

Для удаления нежелательных газообразных примесей используются промывка жидкими абсорбентами и поглощение химически активными твердыми веществами или такими адсорбентами, как активированные угли. В некоторых случаях целесообразно изменить химическую природу газообразных примесей, чтобы поглощение стало эффективным.

Примером такого процесса является каталитическое сжигание загрязнений с образованием двуокиси углерода и паров воды, которые легко удаляются.

Удаление нежелательных газов или паров из газовых потоков часто тесно связано с проблемой фильтрации. Эти отношения можно представить таким образом.

1. В некоторых случаях твердые частицы и пары удаляются отдельно в двухстадийном процессе: на первой стадии улавливаются частицы, на второй — пары. Такая обработка может быть необходимой или когда пары опасны, или когда они представляют ценность и должны быть возвращены. В некоторых случаях необходимо предотвращать возможность попадания частиц в аппарат для улавливания паров.

2. Присутствие аэрозольных частиц может снижать эффективность удаления паров, хотя сами частицы не являются нежелательными или опасными. Это часто зависит от способности паров адсорбироваться на частицах, которые проникают через аппарат для поглощения паров, унося с собой адсорбированные вещества.

3. Один из методов улавливания паров основан на их реакциях с поверхностью твердых реагентов. Пропускание газа через псевдоожиженный слой или введение твердых частиц в газовый поток обеспечивает хороший контакт между паром и твердыми частицами. Поглощение паров в этих условиях протекает более интенсивно, а взвешенные в газе частицы осаждаются при фильтрации на завершающей стадии.

4. В тех случаях, когда пары можно уловить за счет реакций с химически активными реагентами, целесообразно пропитать фильтрующую среду этими реагентами. В таком фильтрующе-сорбирующем материале отфильтровывание частиц и поглощение паров будут происходить одновременно.

Примеры удаления паров, основанные на этих принципах, обсуждаются ниже, причем особое внимание уделено улавливанию продуктов деления и главным образом иоду из газовых потоков ядерных установок.

Раздельное удаление паров и частиц

При получении чистого кислорода и азота путем ректификации жидкого воздуха иногда возникают трудности из-за наличия примесей в воздухе. Особенно опасен ацетилен, так как он образует твердые осадки, которые накапливаются в технологическом оборудовании и создают потенциальную опасность самопроизвольного взрыва. В обычной атмосфере содержание ацетилена составляет $1 \cdot 10^{-7}$ об. %, в промышленных районах $1 \cdot 10^{-4}$ об. %, а на заводах крекинга нефти оно иногда достигает в короткие промежутки времени $1,5 \cdot 10^{-3}$—$3,0 \cdot 10^{-3}$ об. %. Для безопасных условий работы исходный воздух должен содержать ацетилена не более $1 \cdot 10^{-4}$ об. % [19].

Многие заводы жидкого воздуха расположены в районах с загрязненной атмосферой, поэтому необходимо принимать меры для снижения концентрации ацетилена в нагнетаемом воздухе. Обыч-

ным промышленным процессом очистки воздуха является каталитическое сжигание примесей при температуре около 300° С [20]. Катализатор гопкалит (смесь двуокиси марганца и окиси меди) помещается внутри небольшого цилиндрического корпуса, воздух радиальным потоком проходит снаружи через слой катализатора. Для защиты поверхности гранул катализатора от осаждения пыли на перфорированный цилиндр наматывают фильтрующий материал, устойчивый к температурным изменениям.

В качестве фильтрующей защиты сорбентов и катализаторов используют также пористые металлокерамические и керамические фильтры для улавливания частиц масляного тумана из газов, направляемых для осушки силикагелем или активированной окисью алюминия [21]. Оба приведенных примера иллюстрируют типичное применение фильтрации в качестве обязательной ступени в процессе очистки газов и воздуха от парообразных примесей.

Одновременное удаление пара и аэрозольных частиц

Очистка газовых потоков от радиоактивного иода является характерным примером тесной взаимосвязи процессов фильтрации и поглощения паров, поэтому с целью эффективного проектирования установок для удаления иода во многих процессах ядерной технологии необходимо дать оценку этим процессам.

Несколько изотопов иода образуются как продукты деления урана и плутония. Некоторые из этих изотопов являются радиоактивными, наиболее важные из них I^{131} ($T_{1/2}$ = 8 дней),

$$I^{132}\,(T_{1/2} = 2{,}4\ ч), \quad I^{133}\,(T_{1/2} = 20{,}8\ ч)$$

и

$$I^{135}\,(T_{1/2} = 6{,}68\ ч).$$

Радиоактивный иод особенно опасен, так как при попадании в организм он способен селективно накапливаться в щитовидной железе. I^{131} с периодом полураспада 8 дней наиболее вреден.

Активность изотопов иода на 1 *т* урана при мощности облучения 1 *Мвт* приблизительно следующая: I^{131} — 24 000 *кюри*; I^{132} — 37 000 *кюри*; I^{133} — 55 000 *кюри*; I^{135} — 50 000 *кюри*. Такая активность становится примерно постоянной в ядерном топливе после 60 дней облучения, но общее количество иода в топливе, активного и неактивного, увеличивается ориентировочно со скоростью 3 *г* на 1 *Мвт* в год.

Установлены различные нормы для защиты рабочего персонала ядерно-энергетических производств, а также населения близлежащих районов. Предельно допустимые концентрации (ПДК) I^{131} в воздухе на атомных заводах с 40-часовой рабочей неделей составляют $6 \cdot 10^{-12}$ *кюри/л*. Для населения, не занятого в производстве, но длительное время находящегося в районе атомных заводов, рекомендуется в 10 раз меньшая предельно допустимая концентрация [22]. В случае аварии кратковременная ПДК I^{131}

с учетом времени экспозиции установлена в $1{,}2 \cdot 10^{-4}$ *кюри · сек/м*^{3} [23], а так как удельная активность I^{131}, выделяющегося во время аварии в реакторе, составляет примерно 10^4 *кюри/г*, то в расчете на общий иод это количество эквивалентно примерно $1 \cdot 10^{-6}$ *(г·сек)/м*^{3}. При экспозиции в 1 *ч* это соответствует концентрации $3 \cdot 10^{-7}$ *мг/м*^{3}. Все эти цифры говорят о малости концентраций, с которыми необходимо оперировать в процессах улавливания иода, даже полагаясь на последующее рассеивание в атмосфере.

Иод выделяется из облученного топлива при его химической переработке и из дефектных топливных элементов в реакторах.

В процессах химической переработки облученное топливо растворяется в азотной кислоте, и сдувки из аппаратов растворения содержат иод. Обычно переработка топливных элементов происходит после их выдержки («старения») в течение 100—200 дней, проводимой для уменьшения общей активности продуктов деления, и, следовательно, радиолиза растворителей, используемых в экстракционных процессах. После выдержки остающаяся в топливе активность I^{131} составляет незначительную долю активности «горячего» топлива. В радий-лантанном процессе [24] радиоизотоп Ba^{140} выделяют из топливных элементов, изготовленных на основе алюминия, после двухдневной выдержки их растворением элементов в растворе $NaOH$. Сдувки этого процесса содержат значительную активность в виде I^{131} и для снижения этой активности до допустимых уровней необходимо принять соответствующие меры.

В большинстве реакторов, действующих или строящихся в настоящее время, ядерное горючее заключено в металлические оболочки, чтобы предотвратить коррозию топлива теплоносителем и утечку продуктов деления в реактор. В некоторых мощных реакторах с большим количеством топливных элементов после введения их в реактор могут появиться дефекты, что легко обнаруживается вследствие появления продуктов деления в теплоносителе. Облучение топлива до высокой степени выгорания приводит к разрушению оболочек из-за температурных деформаций урановых блочков, а в случае двуокиси урана — к накоплению газообразных продуктов деления (ксенона, криптона) и созданию высоких давлений внутри оболочек. Выделение летучих продуктов деления в теплоноситель (иод весьма летуч при реакторных температурах) может увеличить опасность, так как утечка газа из контура охлаждения почти неизбежна. Так как крайне нежелательно останавливать мощный реактор и удалять сложные топливные элементы при повреждении оболочек одного или нескольких элементов, то необходимо обеспечить возможность нормальной работы реактора с небольшим числом дефектных элементов. Для этого надо улавливать выделяющийся иод.

Более опасны по возможности выделения иода аварии реактора. Неполадки в системе охлаждения, ведущие к перегреву и разрушению топливных элементов, а также расплавление ядерного топлива могут сопровождаться выбросом значительного количества иода.

Из окисленного металлического урана или во время расплавления урана или двуокиси урана иод выделяется почти полностью. Самая большая авария произошла в 1957 г. на одном из реакторов в Уиндскейле; топливо перегрелось и окислилось и через выбросную трубу было выброшено 20 000 *кюри* I^{131} [25]. Осаждение иода на окружающие пастбища привело к появлению его в коровьем молоке прилегающего района. Пришлось запретить употребление этого молока на несколько недель, пока активность иода стала незначительной.

Удаление иода из газовых потоков

В газовом потоке иод находится главным образом в молекулярной форме I_2 и может легко вступать во взаимодействие со многими реагентами: тиосульфатом, содой, карбонатом калия, медной фольгой, серебром. Кроме того, он хорошо адсорбируется активированными углями. При изыскании эффективных процессов удаления иода были изучены все эти поглотители.

Выше уже отмечалось, что улавливание иода в атомной промышленности необходимо проводить при очень низких концентрациях. Во время аварии в 1957 г. в Уиндскейле концентрация иода в газах, выходящих из реактора, составляла около $1 \cdot 10^{-3}$ *мг/м*^{3} [26]. Решение проблемы эффективного улавливания иода при таких низких концентрациях весьма затруднительно, вследствие того что химические состояния иода часто изменяются. В экспериментальной работе, выполненной в Гарвардском университете [27], было показано, что при пропускании паров иода с концентрацией в несколько сот миллиграммов на кубический метр через медные сетки коэффициент очистки составил 10^3 — 10^4 (коэффициент очистки — отношение входной концентрации к выходной). Причем такие коэффициенты очистки можно получить только при высоте слоя сеток в несколько десятков миллиметров и скорости 0,3 *м/сек*. При более низких концентрациях (порядка 10^{-2} *мг/м*^{3}) коэффициент очистки падает до 50. Банкрофт [28], проведя серию аналогичных экспериментов, установил, что коэффициент очистки при пропускании газа через медные сетки закономерно снижается от 500 до 1,2 с уменьшением концентрации иода от 130 до 10^{-7} *мг/м*^{3}.

В научно-исследовательском центре реакторов в Харуэлле на реакторе Веро в качестве аварийного аппарата в контуре охлаждения установлен скруббер, орошаемый раствором карбоната калия. Скруббер содержит слой колец Рашига размером 25 $\times$ 25 *мм*, слой имеет высоту 1,8 *м*. Он был спроектирован на основе экспериментов Тейлора [29] с коэффициентом очистки по парам иода 20.

В испытаниях, в которых пары иода были введены в газовый поток непосредственно перед скруббером, коэффициент очистки составлял от 29 до 32 [30]. Однако, когда в газовый поток, содержащий пары иода, был введен аэрозоль с частицами размером около 0,01 *мкм* (он был получен нагреванием проволоки до красного ка-

ления), коэффициент очистки снизился до 10,5. Введение возгонов свинца в поток перед скруббером снизило коэффициент очистки еще более — до 1,4 (эффективность улавливания иода составила 70%). Эти испытания позволили сделать вывод, что пары иода могут быть адсорбированы высокодисперсными частицами, которые не улавливаются в скруббере.

Одной из трудностей в исследованиях природы иода в газовых потоках при низких концентрациях является его адсорбция на стенках сосудов и газоходов, в которых проводятся опыты. Чемберлен и др. [31] применили в исследовательских реакторах Dido и Pluto противоаварийные оболочки (объемом 7000 $м^3$) в качестве опытных укрытий с большим отношением объема к поверхности. В экспериментах на реакторе Dido в системе очистки с рециркуляцией была исследована работа скруббера, орошаемого раствором соды. Иод выделялся в виде пара, его номинальная концентрация вначале была $1 \cdot 10^{-3}$ *мг/м*^{3}. Начальная эффективность скруббера составляла 96% (причем иод находился главным образом в виде пара), однако в последующий период она упала до 15%. Исследователи сделали вывод, что на последних стадиях экспериментов иод был адсорбирован ядрами конденсации или ядрами Айткена, частицы радиусом 0,01—0,1 *мкм* присутствовали в обычном атмосферном воздухе в концентрации около 10^4 *см*$^{-3}$. Дальнейшие эксперименты были проведены на реакторе Pluto, причем работали одновременно три системы, в каждой из которых перед поглотителями иода были установлены «абсолютные» фильтры, осаждающие частицы размером до 0,1 *мкм* с эффективностью 99,95%. Эти три системы очистки состояли из скруббера, орошаемого раствором соды, слоя медных сеток и слоя активированного угля. Начальная концентрация иода в укрытии была около $1 \cdot 10^{-3}$ *мг/м*^{3}. Общие коэффициенты очистки были определены для каждой системы, включая абсолютные фильтры, причем измерения вели сразу же после начала выделения паров иода, а также на более поздней стадии (табл. 7.6).

Таблица 7.6

Эффективность улавливания иода

Система очистки	Коэффициент очистки	
	начальный	конечный
Скруббер, орошаемый раствором соды, и фильтр	15	1,3
Медные сетки и фильтр	22	1,1
Активированный уголь и фильтр	2100	9,1

Очень низкое значение коэффициента очистки для системы с медными сетками на последних стадиях опыта указывало на очень низкое содержание иода в молекулярном состоянии.

Было сделано предположение, что при очень низких общих концентрациях иода значительная доля его находится в неопределенной форме, которая не реагирует с медью и содой, но адсорбируется частично активированным углем. Эта часть иода, по-видимому, представляет собой химические соединения иода, образовавшиеся при взаимодействии иода со следами различных примесей в воздухе.

Наличие больших количеств водяного пара в отходящих из реактора газах, особенно в аварийных случаях, было исследовано с точки зрения его влияния на адсорбцию активированным углем. Адамс и Броунинг [32], используя паро-воздушные смеси с температурой 75—118° С при относительной влажности в пределах от 50 до 100%, нашли, что эффективность улавливания изменяется от 99,54 до 99,94% при изменении скорости от 1,45 *м/сек* до 0,12, причем более низкой скорости соответствуют более высокие эффективности. Высота слоя угля была 20 *мм*, начальная концентрация иода — $1 \cdot 10^{-2}$ *мг/м*^{3}.

Влияние температуры на степень улавливания иода из гелия при концентрации 0,1—1 *мг/м*^{3} было изучено с использованием различных сортов активированного угля [33]. Один сорт активированного угля, на поверхность пор которого были нанесены соли меди, серебра и хрома, при температуре 320° С обладал намного лучшей эффективностью, чем другие сорта. Его эффективность (99,99%) сохранялась до 550° С. При работе в атмосфере углекислого газа с температурой до 400° С и при концентрации иода в пределах нескольких миллиграммов на кубический метр использование серебряной сетки перед слоем активированного угля позволило повысить коэффициент очистки по крайней мере в 10 раз [34]. Было высказано предположение, что при этих температурах удерживающая способность угля была снижена, а молекулярный иод взаимодействовал с серебром с образованием иодистого серебра, пары которого легко адсорбируются.

В настоящее время самым эффективным способом улавливания иода из газовых потоков при низких его концентрациях является сочетание высокоэффективной фильтрации аэрозольных частиц с последующей очисткой на активированном угле. Однако использование этого метода в некоторых случаях может быть ограничено. Активированный уголь является реакционноспособным материалом, поэтому при пропускании воздуха он может легко воспламениться. Реальная температура воспламенения зависит от сорта угля, а также от скорости фильтрации газа через слой.

Активированные угли, полученные из скорлупы кокосовых орехов, являются лучшими адсорбентами для иода по сравнению с углями на основе полукоксов, особенно при повышенных температурах. К сожалению, угли из скорлупы кокосовых орехов имеют более низкую температуру воспламенения (обычно 300—350° С), в то время как для углей на основе полукокса температура воспламенения составляет 400—500° С [35]. Когда через уголь пропускают

ся газы-окислители, то необходимо предусматривать их охлаждение перед поступлением в слой угля.

За исключением температурных ограничений, комбинация абсолютного фильтра со слоем активированного угля является наиболее подходящей, особенно с учетом аварийных случаев. При этом не требуется специальный пусковой период и нет подвижных частей, кроме вентилятора или газодувок. Жидкостные скрубберы требуют резерва абсорбирующего раствора и запасного насоса для рециркуляции. Кроме того, возникает проблема удаления отработанной жидкости.

Способы удаления иода для типичных реакторов с газовым охлаждением

Типичный мощный реактор, в котором топливом служит двуокись урана, а теплоносителем углекислый газ, может иметь три ступени противоаварийных защитных оболочек: контур высокого давления, биологическое защитное устройство, окружающее контур высокого давления, и внешняя противоаварийная защитная облочка, спроектированная для того, чтобы вместить все газы, которые могут быть выделены из-за неисправностей в контуре [36]. Существует несколько возможных источников выделения газов, требующих очистки от продуктов деления (особенно иода) перед выбросом в атмосферу.

1. Утечка теплоносителя в защитную зону, образованную биологической защитной оболочкой. Она может быть причиной проникновения иода из контура высокого давления, где он может накапливаться в результате работы с небольшим числом дефектных топливных элементов. Для предотвращения распространения активных газов внутри рабочих помещений необходимо непрерывно отсасывать газ из биологической зоны и удалять из него иод.

2. Сброс газа из контура высокого давления в атмосферу—неотъемлемый процесс нормальной работы реактора. Например, для реактора большой тепловой мощности, допустим 1000 *Мвт*, количество газа (CO_2) в контуре может составлять 100 *т*; для сброса его за несколько часов необходимы очень высокие скорости газа. Следовательно, для удаления иода в этих условиях требуются установки, способные работать в течение коротких периодов времени с высокой производительностью. Такие же выбросы могут произойти при срабатывании предохранительных клапанов контура высокого давления.

3. Разрушение первичного контура. В этом случае, вообще маловероятном, выделившиеся газы попадут в главную противоаварийную защитную зону (оболочку). Они могут содержать большие количества активного иода, если при аварии будут повреждены значительные количества кассет с топливными элементами. Такие газы необходимо удалить в кратчайший срок, чтобы снизить до минимума выброс в атмосферу и уменьшить осаждение продуктов деления на

поверхностях в пределах защитной оболочки. Иначе серьезно усложнятся работы по дезактивации и ремонту.

Схематическое изображение систем газоочистки приведено на рис. 7.21. Установки газоочистки, как правило, проходят высокоэффективную фильтрацию аэрозолей и адсорбцию на активированном угле. Для уменьшения нагрузки по пыли на абсолютные фильтры перед ними устанавливают грубоволокнистые предфильтры, а за слоями угля — дополнительные фильтры, предназначенные для

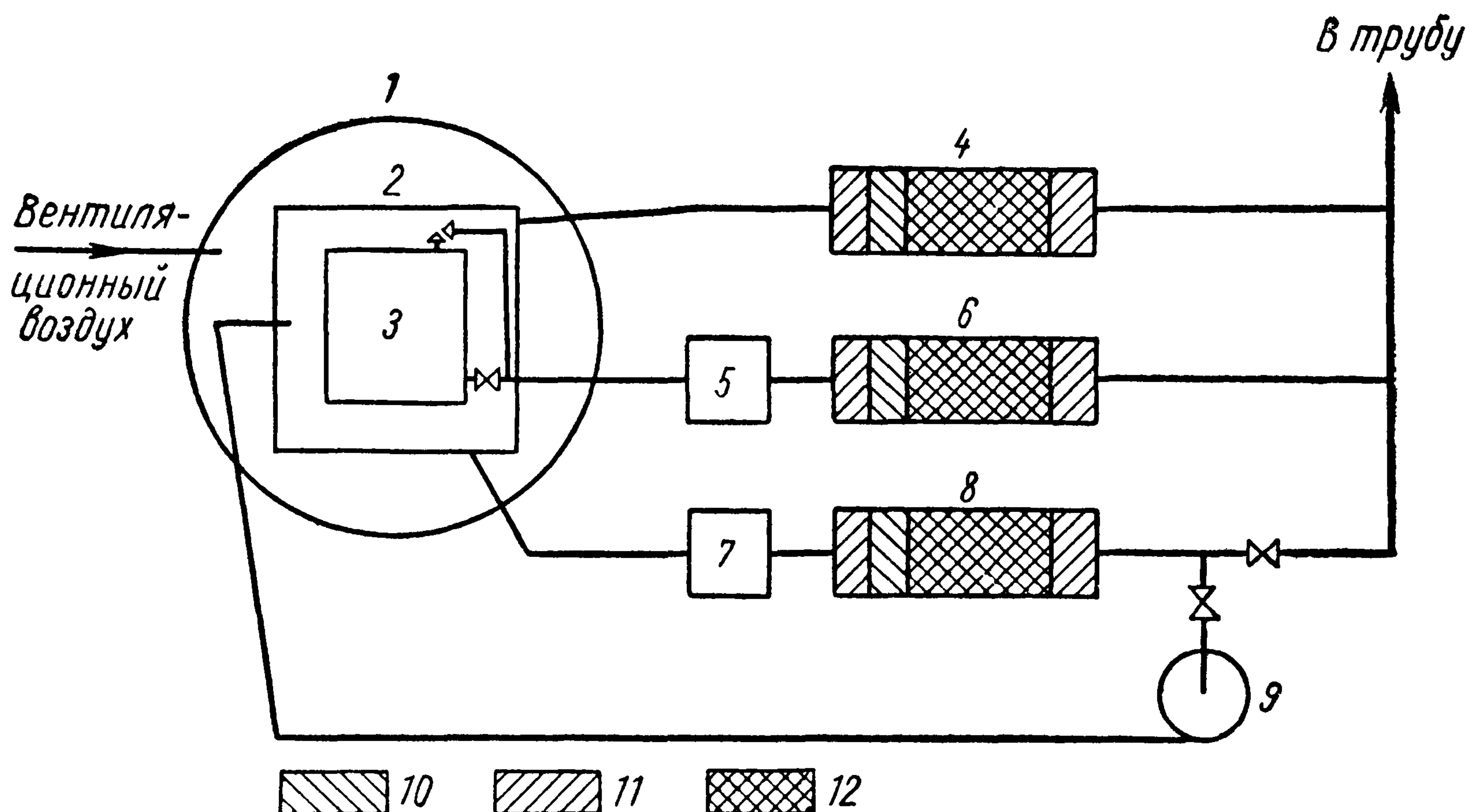


Рис. 7.21. Схема газоочистительной установки для газоохлаждаемого реактора:

1 — главная защитная оболочка; 2 — биологическая защитная оболочка; 3 — активная зона реактора и первичный контур охладителя; 4 — вентиляционная установка; 5 — охладитель; 6 — установка в системе продувки и выхлопа через сбросной клапан; 7 — теплообменник; 8 — главная аварийная установка; 9 — рециркуляционный вентилятор; 10 — абсолютные фильтры; 11 — грубоволокнистые фильтры; 12 — слой активированного угля.

улавливания частиц угля, унос которых из слоя вполне возможен. Главная аварийная установка может работать как рециркуляционная до тех пор, пока можно безопасно выбрасывать газы в атмосферу через трубу. Однако применение рециркуляционной системы может быть ограничено производительностью иодоулавливающих аппаратов. Проникание загрязненных газов через защитную оболочку сразу же после аварии зависит от скорости утечки и концентрации иода в газе. Так как важнейшей проблемой является снижение концентрации в возможно короткий срок, целесообразнее использовать установку средней эффективности и высокой производительности. Необходимость применения мощных вентиляторов на крупных реакторах ограничивает скорость газа в контуре рециркуляции, поэтому основное внимание обычно уделяют повышению его герметичности. Газы, направляемые в установки для очистки сбросных газов и в главную аварийную систему очистки, могут иметь температуру до 300° С, поэтому необходимо предусмотреть их охлаждение. Для

сбросной вентиляционной системы удобнее использовать охладитель в виде слоя гальки соответствующего размера, который может поглотить заметное количество тепла за короткое время сброса. В главной аварийной установке, где может потребоваться непрерывная работа, целесообразно использовать водоохлаждаемый теплообменник.

Типичные параметры установок для реактора мощностью 1000 *Мвт* следующие.

Вентиляционная установка. Производительность 8500 $м^3/ч$.

Площадь, занимаемая предфильтром, 1,86 $м^2$. Площадь, занимаемая абсолютным фильтром, 1,86 $м^2$.

Размер адсорбера со слоем угля 7,43 $м^2 \times 0{,}3$ *м* (высота слоя).

Площадь, занимаемая замыкающим фильтром, 1,86 $м^2$.

Общая потеря давления 225 *мм* вод. *ст.*

Установка для сброса и выхлопа газов через сбросной клапан. Производительность сбросной системы 5,44 *кг/сек* в течение 5 *ч.*

Производительность выхлопа через клапан 90,8 *кг/сек*, вероятно, в течение нескольких секунд.

Гравийный теплообменник: площадь 27,9 $м^2$, высота слоя 0,3 *м*, зернение 25 *мм.*

Площадь, занимаемая предфильтром, 23,2 $м^2$.

Площадь, занимаемая абсолютным фильтром, 23,2 $м^2$.

Размер адсорбера со слоем угля 55,7 $м^2 \times 0{,}3$ *м* (высота слоя).

Площадь, занимаемая замыкающим фильтром, 23,2 $м^2$.

Общая потеря давления 1500 *мм вод. ст.*

Так как абсолютные фильтры недостаточно прочны и могут выдерживать только небольшие перепады давления, при проектировании установки необходимо учесть воздействие воздушного удара, возникающего при срабатывании выхлопного клапана.

Главная аварийная установка. Производительность в режиме циркуляции 34 000 $м^3/ч$.

Теплообменник: 1829 *м* ребристых труб в трубе с площадью сечения 0,557 $м^2$.

Площадь, занимаемая предфильтром, 11,15 $м^2$.

Площадь, занимаемая абсолютным фильтром, 11,15 $м^2$.

Размер адсорбера со слоем угля 23,2 $м^2 \times 0{,}3$ *м* (высота слоя).

Площадь, занимаемая замыкающим фильтром, 11,15 $м^2$.

Мощность двигателя вентилятора 253,5 *л. с.*

В качестве абсорбента иода, выделяющегося при аварии реактора, было предложено использовать воду. В канадском реакторе NPD [37] горячая тяжелая вода идет из реактора в парогенератор. В случае разрыва трубы, подводящей эту воду, в помещении для парогенератора может образоваться большое количество пара и возникнет избыточное давление. Чтобы исключить это, из помещения для парогенератора предусмотрена труба, через которую сбрасывается первая волна пара. Паропровод автоматически управляется при перегреве топливных элементов, вызывающем начальный скачок давления пара. Это позволяет вовремя ввести в помещении парогене-

ратора систему орошения водой из большого резервного бака, расположенного на крыше строения. Такое орошение водными струями позволяет подавить любое увеличение давления, вызванное утечкой пара или горячей воды. Вода подается в течение 2 *мин* со скоростью 500 $м^3/мин$ в начале процесса и около 82 $м^3/мин$ в конце его. Испытания показали, что такое быстрое заполнение помещения водой позволяет при разрыве труб весьма эффективно улавливать продукты деления, содержащие иод. В условиях, моделирующих аналогичную аварию, было установлено, что распределение иода между водой и воздухом через 5 *мин* после аварии соответствовало отношению $10^4 : 1$.

Другим примером использования больших объемов воды для предотвращения роста давления вследствие разрушений в контуре и для улавливания загрязняющих продуктов деления является реактор, охлаждаемый водой под давлением PWR [38]. Парогенератор реактора и первичный водяной контур расположены под сводом, из которого единственное выходное отверстие направлено в большой бассейн с водой. Опыты показали, что продукты деления, включая иод, почти полностью удаляются из сбросного воздуха, который барботирует через всю поверхность бассейна.

О новом методе быстрого снижения концентрации активного иода внутри реакторной установки в период аварии сообщил Сильверман [39]. Этот метод основан на образовании пены загрязненным воздухом, так что он полностью находится внутри множества пузырьков, имеющих огромную поверхность, которой улавливаются пары и аэрозольные частицы; лабораторные исследования показали весьма быстрое снижение концентрации иода.

Улавливание паров при реакциях с твердыми веществами с последующей фильтрацией

Светлые масла, образующиеся в качестве побочных продуктов коксовых печей, являются важным источником получения бензола, толуола и ксилола.

В последнее время промышленные требования к повышению качества ароматических углеводородов возрастают; например, бензол, выпускаемый заводами, непригоден для получения синтетических волокон вследствие высокого содержания тиофена. Промывка такого бензола кислотой и щелочью не приводит к заметному снижению содержания тиофена. В настоящее время [40] пары ароматических веществ пропускаются через псевдоожиженный слой инертного материала, на который осажден металлический натрий. В качестве инертного носителя используется песок. Для более равномерного покрытия зерен песка на них наносятся небольшие количества стеаратов некоторых металлов. При температуре слоя 230—260° С содержание тиофена в ароматических соединениях может быть снижено до сотых и тысячных долей объемного процента при начальном содержании в несколько процентов. Унос твердых частиц

из слоя предотвращается пористыми фильтрами из нержавеющей стали, которые устанавливаются на выходе газа из аппарата.

Этот принцип был использован для очистки выбросных газов от фтористых соединений и окислов серы [41]. Порошки твердых веществ, которые будут реагировать с газообразными примесями, непрерывно вводятся в газовый поток, образуя на поверхности ткани рукавных фильтров фильтрующий пылевой слой, что позволяет полнее использовать поглотительную способность порошков. Эффективность улавливания в таких системах составляла до 95% по газообразным фтористым соединениям и 99% по пыли.

Улавливание паров за счет реакций в зернистом фильтре

В некоторых процессах зернистый фильтр используется с целью получения большой площади поверхности для осуществления реакций с паро- или газообразными примесями.

Имеется описание процесса очистки от сернистых соединений, который пригоден для улавливания следов таких примесей из атмосферного воздуха, что очень важно для сохранения чистоты серебряных поверхностей электрических проводников и контактов [42]. Потемнение серебряных поверхностей в результате взаимодействия с сернистыми соединениями воздуха в определенных условиях может привести к серьезным изменениям в их проводимости и сопротивлении. Сернистые соединения могут быть уловлены из воздуха при пропускании его через фильтрующую среду, пропитанную следующими реагентами:

уксуснокислый цинк 20 частей
полиэтиленгликоль 10—20 частей
56%-ная уксусная кислота 0,05 части
гидразинсульфат 0,05 части

При взаимодействии сернистых соединений с ацетатом цинка образуется сульфид цинка. В присутствии гидразинсульфата, действующего каталитически, в уксуснокислой среде сульфид цинка превращается снова в ацетат цинка и сульфид-ион. Гликоль поглощает из воздуха пары воды, обеспечивая постоянное увлажнение фильтра, что значительно облегчает течение процесса. Кислотность среды поддерживается уксусной кислотой.

Аналогичным процессом, основанным на этом принципе, является улавливание паров ртути из воздуха при пропускании его через фильтр, содержащий соединение, которое получено при нагревании до 100° С смеси поливинилпиролидона и элементарного иода [43].

ЛИТЕРАТУРА

1. Friedlander S. et al. Handbook on Air Cleaning. USAEC, 1952.
2. Stairmand C. J. Inst. Fuel, Feb., 1956.
3. Air Pollution. Ed. A. Stern. vol. II. N.Y., Academic Press, 1962.

4. Underwood G. Internat. J. Air and Water Pollution, **6** (1962).
5. Drinker P., Hatch T. Industrial Dust. N.Y., McGraw-Hill, 1954.
6. Anderson E. Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs, **16**, 69 (1925).
7. Stairmand C., Kelsey R. SCI Symp. Prevention of Atmospheric and Water Pollution. April 1955.
8. First M. Amer. Industr. Hyg. Assoc. Quart, **11**, 4 (1950).
9. Heim G., Orban A. Air Pollution Control Assoc., **11**, 205 (1961).
10. Lapple C., Kamack H. Chem. Engng Progr., **51**, 110 (1955).
11. Parkington J., Laurie-Walker S. Attainment of High Precipitation Efficiencies on Fine and Sub-micromic Dusts and Fumes. Grenable (Conf.), 1960.
12. Rose H., Wood A. An Introduction to Electrostatic Precipitation in Theory and Practice. Lond., Constable, 1956.
13. Little A. Trans. Instn Chem. Engrs, **34**, 259 (1956).
14. Frederic E. Chem. Engng, **68**, 13 (1961).
15. Penrose M. J. Instn. Heat and Ventilat. Engrs, July 1961.
16. Squires B. Fabric Filter Dust Collectors. Chem. and Process Engng, April 1962.
17. First M. et al. Industr. and Engng Chem., **43** 1363 (1951).
18. Billings C. et al. L. Air Pollution Control Assoc., **8**, 185 (1960).
19. Kerry F. Chem. Engng Progr., **52**, 441 (1956).
20. Mine Safety Appliance Co. MSA Technical Products Release 1501.
21. Eiloart T. Brit. Chem. Engng, **7**, 837 (1962).
22. Recommendations of Internat. Commission on Radiological Protection, 1954.
23. Authority Code, No. **E12** (1961), UKAEA.
24. Cederburg G., Brewer J. 6th AEC Air Cleaning Conference TID **7593**, p. 9 (1960).
25. Dunster H. 2nd Geneva Conf. P/316.
26. Chamberlain A. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., **85**, 350 (1959).
27. Silverman L. et al. 6th AEC Air Cleaning Conference. TID 7593, p. 322 (1960).
28. Bancroft A. et al. CRCE-981, 1960.
29. Teylor R. Chem. Engng Sci., **10**, 68 (1959).
30. May F., Morris J. (не опубликовано).
31. Chamberlain A. et al. AERE-R **3412** (1960).
32. Adams R., Browning W. USAEC Rep. ORNL-CF-60-**11**-**39** (1960 .
33. Adams R., Browning W. 7th AEC Air Cleaning Conf. TID **7627**, p. 242 (1962).
34. Morris J. (не опубликовано).
35. May F. (не опубликовано).
36. Riley J. 7th AEC Air Cleaning Conf. TID-**7627**, p. 523 (1962).
37. Watson L. et al. CRCE-**979** (1962).
38. Ashworth C. et al. Nuclear Engng, 315 (1962).
39. Silverman L. et al. 7th AEC Air Cleaning Conf. TID-**7627**, p. 390 (1962).
40. Nobis J., Watson L. US Pat. 2960546, 1960.
41. Squires B. Chem. and Process Engng, **43**, 156 (1962).
42. Remer R. US Pat. 2955908, 1960.
43. Hosmer W. US Pat. 2964447, 1960.

Глава VIII

ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ УСТАНОВОК

Выбор типа фильтрующей установки в основном определяется количеством очищаемого газа или воздуха и концентрацией пыли. Количество воздуха зависит от объема рабочих помещений и кратности воздухообмена, которые, в свою очередь, определяются условиями работы или необходимостью удалять загрязнения или уменьшать их концентрацию путем разбавления. Общая производительность зависит также от возможности повторного использования очищенного воздуха в технологических процессах или в рабочих помещениях. Поэтому система распределения воздушных и газовых потоков через различные помещения здания должна рассчитываться в соответствии с типом рабочих помещений и степенью вредности образующихся аэрозолей.

Прежде всего следует оценить характер пылевыделения, определить возможные величины запыленности при данном процессе и, если это возможно, попытаться снизить пылевыделение, изменив технологию процесса. Далее рассматривается система мероприятий по борьбе с пылью. Первая задача — контроль над источниками пылевыделения в тех местах, где происходят процессы (например, в рабочих комнатах, вытяжных шкафах или перчаточных боксах), и над устройствами для удаления пыли (местными отсосами, вытяжными зонтами, отсосами через ограждения или уборкой всего помещения). Для особо опасной пыли расчеты следует вести исходя из концентрации, которая может возникнуть при аварии; для таких случаев должны быть разработаны специальные методы контроля. Зная концентрацию пыли в газоходах, можно приступить к выбору способа ее улавливания.

При очень высоких концентрациях следует проводить местное улавливание большей части грубой пыли, например при помощи циклонов. Конструкция воздуховодов не должна допускать скопления осадка пыли. Это особенно нежелательно при наличии воспламеняющихся веществ и γ-активных материалов. Если после местных пылеуловителей запыленность все же выше предельно допу-

стимой, то следует предусмотреть установку системы более тонкой очистки, включающей при необходимости высокоэффективные фильтры. В этом случае применяется фильтр предварительной очистки для снижения концентрации до величины, при которой может работать высокоэффективный фильтр. Необходимо провести сравнение стоимости предфильтров и стоимости замены фильтров тонкой очистки при отсутствии предварительной очистки. Этот расчет особенно необходим в тех случаях, когда начальная пылевая нагрузка целиком или частично ложится на предфильтр.

Выбрав рациональную первую ступень улавливания, можно приблизительно оценить концентрацию пыли, поступающей в высокоэффективный фильтр, степень очистки которого должна обеспечить выбросы пыли с концентрацией ниже предельно допустимой. Если концентрация после фильтра выше предельно допустимой, то для снижения запыленности можно использовать дымовую трубу для рассеивания аэрозолей в атмосфере.

Располагая данными по производительности и эффективности требуемых фильтров, можно выбрать подходящий тип фильтра. При необходимости очень высокая эффективность достигается последовательным включением нескольких высокоэффективных фильтров.

Далее рассматриваются вопросы по выбору оборудования и эксплуатации установки. Расход энергии для преодоления сопротивления системы определяется с учетом увеличения сопротивления фильтров по мере забивания их пылью. В этом случае проводится сравнение стоимости энергии на преодоление большого сопротивления и стоимости более частой замены предварительных и основных фильтров.

Перепады давления, которые могут иметь фильтры, не должны приводить к нарушению целостности фильтрующей среды, и это необходимо учитывать заранее. Оцениваются и возможные изменения физического состояния газа (влажность, температура), и их влияние на рабочие характеристики фильтров и эксплуатацию системы в целом. Даже при критических физических условиях должна быть обеспечена нормальная работа системы.

Иногда возникает необходимость в достаточно частой замене фильтрующих элементов. Это также влияет на выбор типа установки и способов замены фильтров или фильтрующей среды. Особенно это относится к фильтрам для очистки воздуха от высокотоксичных веществ, когда должно быть исключено вторичное распространение вредной пыли при замене фильтров.

ОЧИСТКА ПРИТОЧНОГО ВОЗДУХА

Загрязненность воздуха, подаваемого в помещения, определяется выбросами предприятий, расположенных в данном районе (см. гл. II). Для снижения запыленности атмосферного воздуха, поступающего в помещения, воздухозаборные отверстия приточной вентиляции следует располагать выше выбросных труб этого здания.

Необходимо ограничивать возможность проникновения наружного воздуха в рабочее помещение иначе, чем через систему фильтров. Здание должно быть весьма герметичным, в особенности двери и окна. Если двери часто используются, их переделывают в воздушные шлюзы. Один из типов воздушного шлюза — воздушный душ — схематически показан на рис. 8. 1. Рабочий в защитной одежде входит в шлюз, закрывает за собой дверь и попадает под душ очищенного воздуха, который уносит пыль, попавшую в шлюз при открытии входной двери, и пыль с одежды.

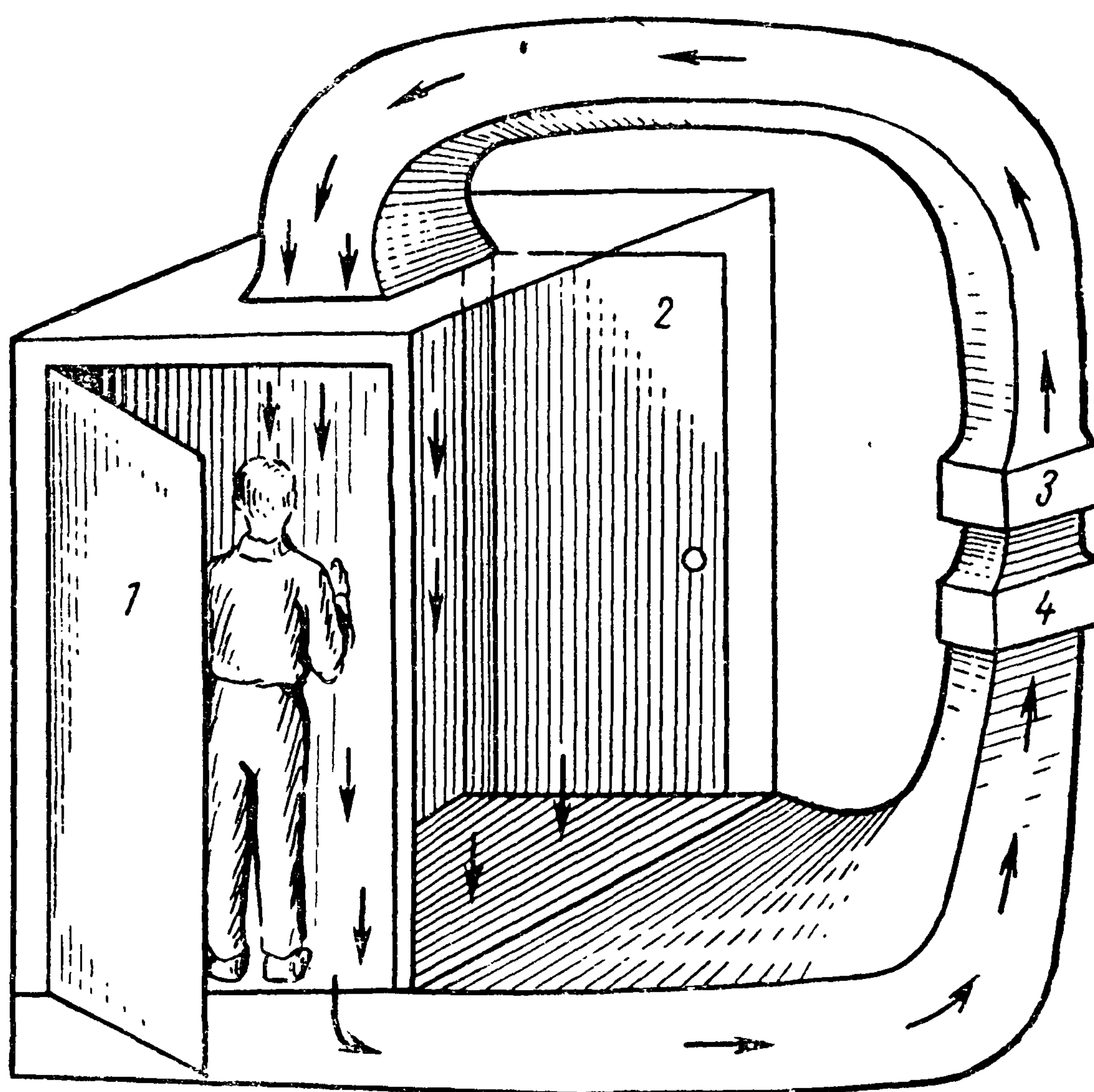


Рис. 8.1. Воздушный шлюз:
1 — входная дверь; 2 — вход в чистую комнату из шлюза; 3 — фильтр; 4 — вентилятор.

Давление в рабочем помещении должно превышать атмосферное, чтобы из помещения мог выходить чистый воздух через неплотности, а загрязненный наружный воздух не попадал бы внутрь. Положительное давление должно сочетаться с высокой герметичностью помещений.

Дополнительно к этому в помещении следует провести комплекс мероприятий для предотвращения образования пыли. Внутренние поверхности помещения должны быть гладкими (пластик, кафель, глянцевая краска), оборудование изготовляется из нержавеющих материалов; специальная одежда обслуживающего персонала не должна образовывать пыль (нейлоновая предпочтительнее хлопчатобумажной). Одежду следует часто стирать и менять, не допуская чрезмерного износа.

Все эти мероприятия довольно дороги, поэтому их следует вводить лишь после тщательного рассмотрения требований к системе. Например, если в воздухе не должно быть бактерий, то чистота одежды и кожного покрова персонала более важны, чем степень износа одежды. Однако и в этом случае следует избегать образования небактериальной пыли, частички которой могут явиться центрами роста бактерий. Все поверхности необходимо мыть, воздушные потоки должны быть организованы таким образом, чтобы до минимума свести оседание пыли.

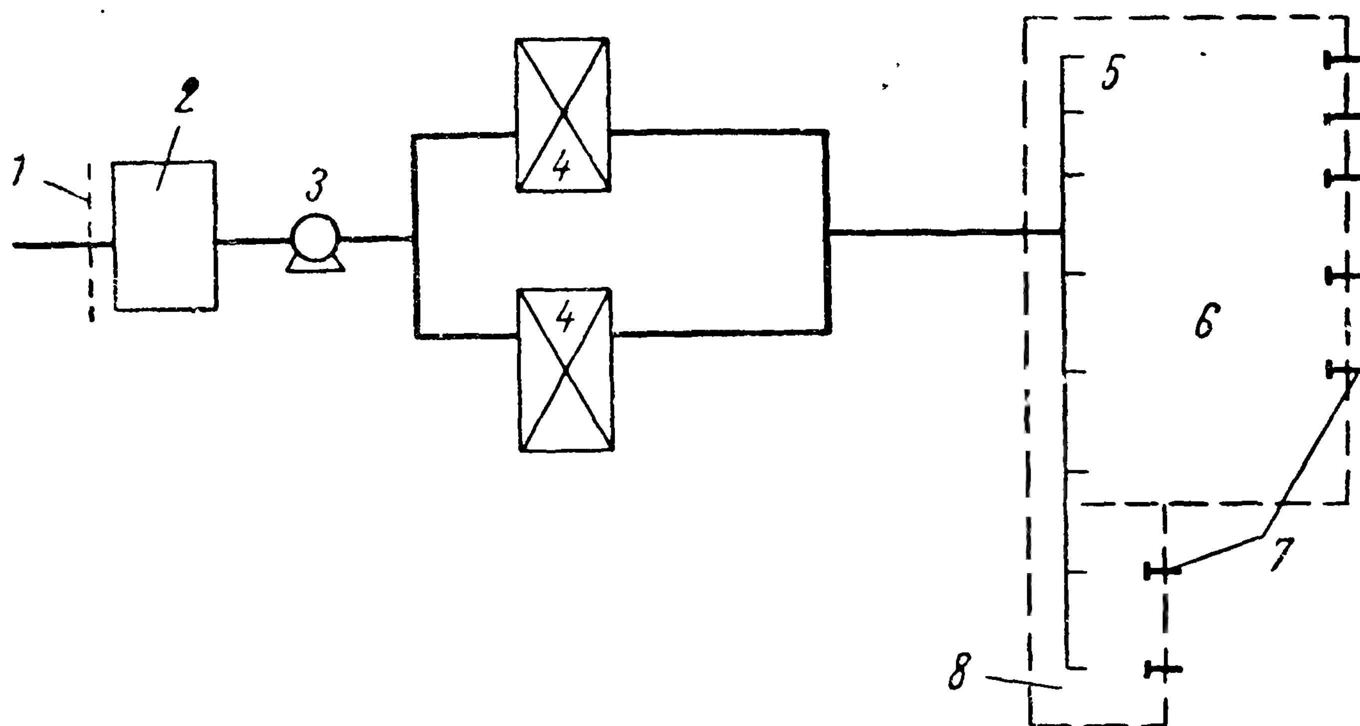


Рис. 8.2. Схема системы очистки воздуха:

1—сетка для улавливания летучего мусора; *2*—кондиционер; *3*—вентилятор; *4*—высокоэффективные фильтры; *5*—распределительные воздуховоды; *6*—чистое рабочее помещение; *7*—выпускные отверстия; *8*—воздушный входной шлюз.

Требуемое количество воздуха должно обеспечить нормальные условия пребывания обслуживающего персонала. Это количество можно определить по обычным нормам отопления и вентиляции. Для производственных помещений, рассматриваемых в книге, кратность воздухообмена должна быть не менее 0,5 в час.

Любая система кондиционирования содержит устройства для подогрева, а иногда для увлажнения или осушки воздуха, которые устанавливаются до фильтров; на входе в здание монтируются жалюзи (рис. 8.2).

При слишком большой запыленности вместо всасывания только наружного воздуха используют систему рециркуляции с добавлением 10% атмосферного воздуха (рис. 8.3). При введении рециркуляции необходимо провести сравнение дополнительных затрат на кондиционирование свежего воздуха, сооружение воздуховодов, энергию, потребляемую вентилятором и системой управления с экономией, получаемой от менее частой замены фильтров и снижения стоимости отопления.

Описанные системы фильтрации очищают воздух настолько, что его можно использовать в большинстве технологических процессов. Однако это не означает, что пыль удаляется полностью. Тща-

тельные замеры обнаруживают концентрацию пыли порядка 10^7—10^8 частиц в 1 *м*^{3} воздуха. Размер частиц в основном менее 0,5 *мкм*, весовая концентрация порядка 0,001 *мг/м*^{3}.

Дальнейшее снижение концентрации пыли можно провести двумя путями.

Первый — бо̀льшая степень очистки воздуха на рабочем месте по сравнению с помещением в целом. Типичный рабочий шкаф схематично показан на рис. 8. 4. Часть очищенного воздуха направляется на рабочую поверхность шкафа, а другая создает предохранительную воздушную завесу. Воздухораспределительные устройства дают возможность использовать большие объемы воздуха с малой

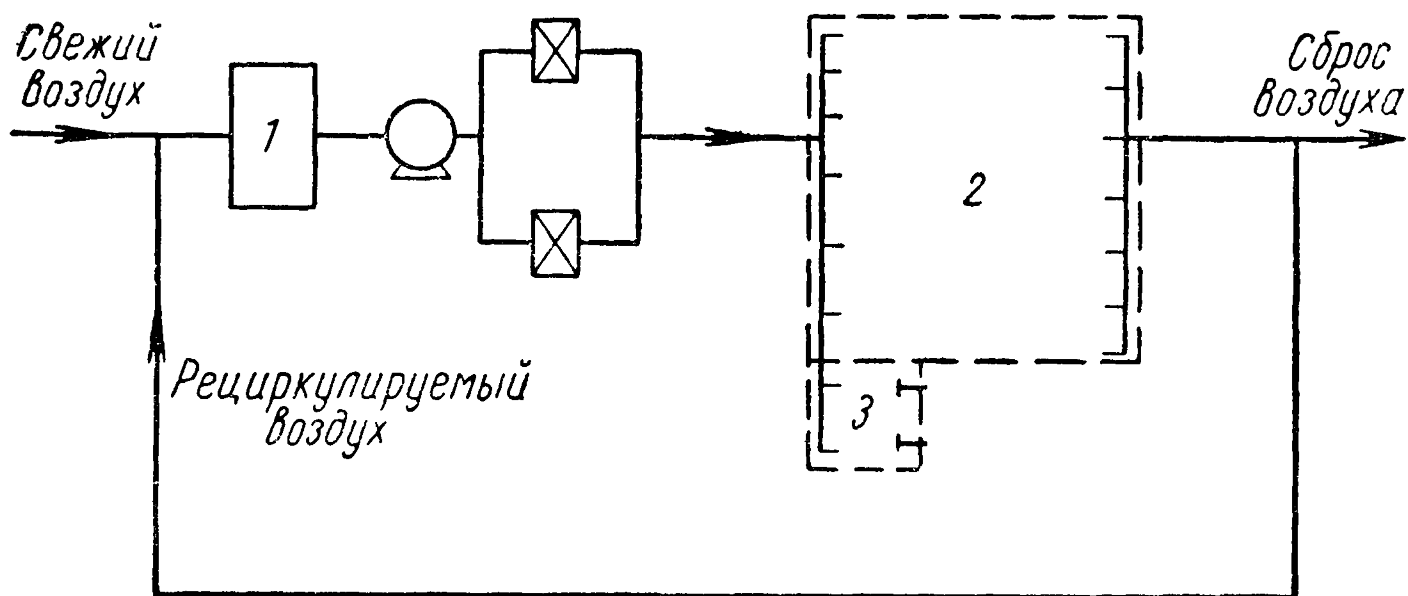


Рис. 8.3. Схема системы очистки воздуха с рециркуляцией: *1* — кондиционер; *2* — чистая комната; *3* — воздушный шлюз.

скоростью, так как не происходит перемешивания пыли вихревыми потоками. Одновременно воздушная завеса обеспечивает поддержание чистой атмосферы и позволяет лаборантам на перчаточных боксах работать без предохранительной одежды. Степень очистки воздуха такой установкой почти полностью зависит от конструкции шкафа и состава воздуха в помещении. При наиболее благоприятных условиях уровень запыленности бывает порядка 10^4—10^5 частиц в 1 *м*^{3} воздуха.

Любая работа, которую можно выполнить на таких установках, обойдется, вероятно, дешевле и будет проведена в лучших условиях по сравнению с целой комнатой.

Второй путь — это снижение концентрации пыли в воздухе всего рабочего помещения. Если невозможно избежать чрезмерного образования пыли в помещении при работе персонала, оборудования и т. д., то необходимо использовать методы повторной очистки воздуха. Они предполагают подачу больших объемов рециркулируемого воздуха (с кратностью воздухообмена 10 в минуту), а также использование решетчатого пола и направленного из потолка (или, что хуже, с уровня рабочих столов) потока воздуха к полу.

Распределение воздушных потоков должно обеспечивать удаление частиц пыли из рабочих зон. Поэтому фильтры располагаются непосредственно за рабочим местом; поток воздуха с расходом по-

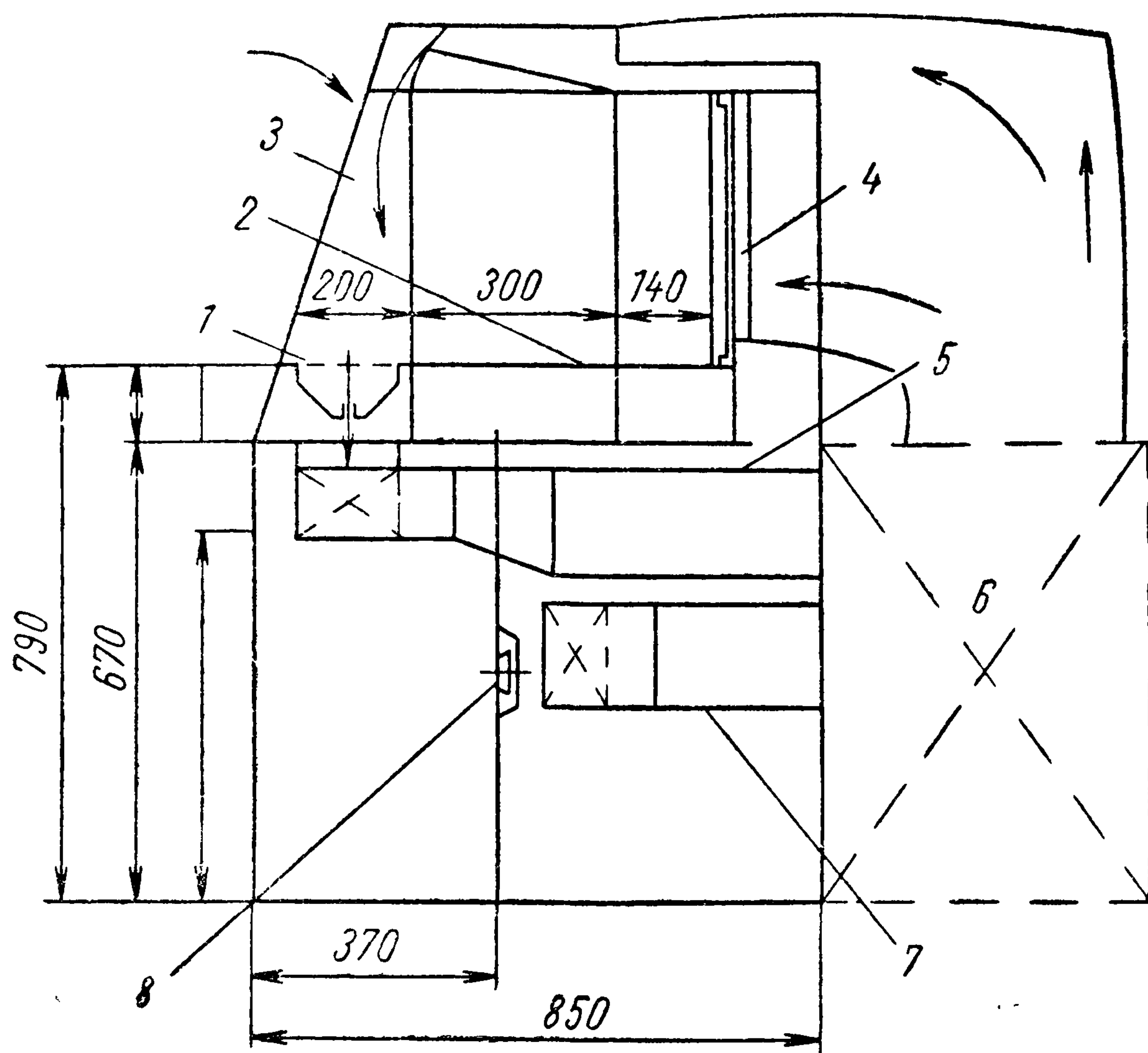


Рис. 8.4. Шкаф чистого воздуха (штрих-пунктирными линиями показан вариант размещения и приблизительные размеры приточной установки):

1 — вытяжная решетка; 2 — рабочая поверхность; 3 — защитная воздушная завеса; 4 — воздухораспределительная пластина; 5 — вытяжной воздуховод; 6 — камера для вентилятора и высокоэффективного фильтра; 7 — приточный воздуховод; 8 — люк для доступа к фильтру.

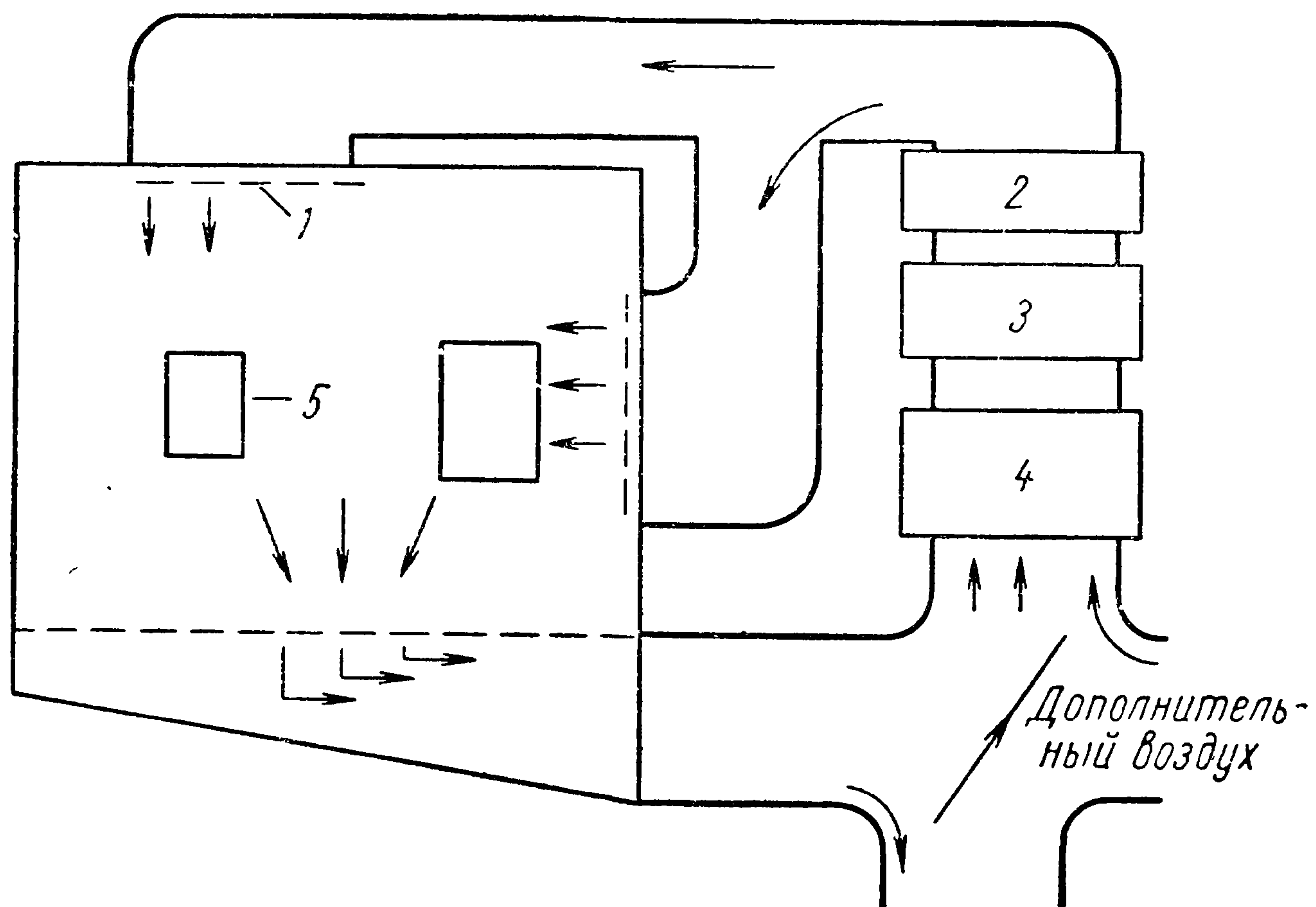


Рис. 8.5. Схема оборудования помещения со сверхчистым воздухом:

1 — воздухораспределительные панели; 2 — абсолютные фильтры; 3 — вентилятор; 4 — предфильтры; 5 — рабочие места.

рядка 170 $м^3/ч$ через решетчатые пластины направляется на рабочее место.

Следует обращать внимание и на такие детали, как выбор непылящих фильтрующих материалов, контроль за персоналом по использованию воздушного шлюза, контроль за степенью износа одежды и т. д. Эти мероприятия менее необходимы при очистке воздуха с частичной рециркуляцией. На рис. 8.5 показана схема такой очистки.

ОЧИСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВЫБРОСОВ

В главе II приведены величины концентраций вредных и токсичных аэрозолей, возникающих при определенных процессах, и максимально допустимые концентрации, безопасные для дыхания. Для любой действующей установки вероятный уровень запыленности имеет первостепенное значение.

Количество приточного воздуха определяется прежде всего необходимостью поддерживать безопасную концентрацию в производственных помещениях, где обслуживающий персонал работает без защитных средств; необходимостью создать соответствующие потоки воздуха в специальных местах, где пыль можно собирать и удалять, например через отсосы, и, наконец, необходимостью контроля за разбавлением запыленного воздуха перед поступлением в фильтры.

Количество воздуха в соответствии с этими требованиями обычно намного больше того, что необходимо для нормальных условий работы, например, кратность воздухообмена 10—20 в час по сравнению с 1/2. Перемещение и очистка больших объемов воздуха связаны со значительными затратами, поэтому следует любыми способами экономить воздух (например, перепуском из одного помещения в другое).

Что касается пылевой нагрузки, то усилия должны быть направлены на то, чтобы, во-первых, свести до минимума возможность образования пыли в рабочих помещениях и проникновения пыли извне, и, во-вторых, задержать пыль в фильтрах, насколько это возможно. Для этого необходимы герметичные здания с высокоэффективными системами очистки приточного воздуха. Только в этом случае атмосферная пыль не попадет в здание и не увеличит нагрузки на высокоэффективные (обычно малопроизводительные) фильтры вытяжной системы. По той же причине необходимо устранять источники пыления внутри здания (например, волокна с одежды).

Высокая кратность воздухообмена обусловливает создание крупных фильтрующих установок. Так, для помещения площадью 565 $м^2$ высотой 3,0 *м* при кратности 10 в час общее количество приточного и вытяжного воздуха будет порядка 17 000 $м^3/ч$.

Пылевая нагрузка на фильтры вытяжной системы состоит из пыли, образующейся в производственных процессах, и из какого-то количества атмосферной пыли, проходящей через фильтры приточ-

ной системы. Эффективность фильтров приточной системы будет влиять на срок службы фильтров вытяжной системы. Для любого процесса осаждение пыли будет зависеть в значительной степени от воздушных завес и других причин, которые рассмотрены ниже.

Простейшей схемой очистки аспирационного воздуха является вытяжка его из различных рабочих помещений с заданным разрежением через воздуховоды и фильтры и затем удаление из здания через трубу.

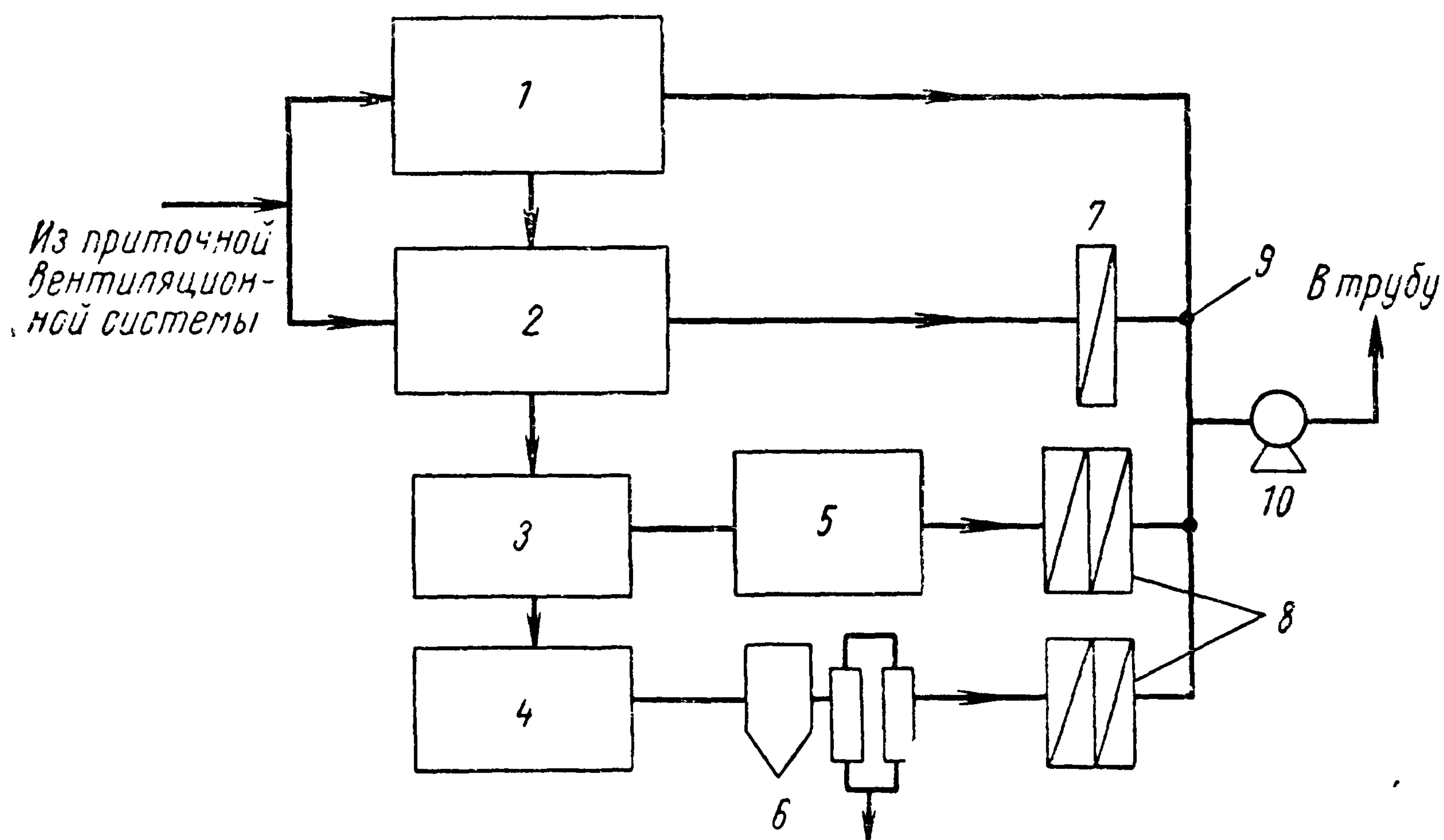


Рис. 8.6. Схема вытяжной вентиляции:

1 — рабочее помещение с низкой концентрацией пыли; *2* — рабочее помещение с высоким содержанием пыли; *3* — специальные ограждения; *4* — пылеотсасывающие насадки; *5* — местные предфильтры; *6* — местные пылеуловители (циклоны, тканевые фильтры и т. д.); *7* — фильтр; *8* — секции фильтров; *9* — место смещения потоков; *10* — вентилятор.

В некоторых случаях концентрация может быть так мала, что очистка воздуха вообще не потребуется. Иногда потоки воздуха проходят через специальные ограждения, которые используются для направленного перемещения пыли в заборные устройства пылеуловителей. В этом случае содержание пыли в отсасываемом воздухе будет намного выше, поэтому потребуется несколько ступеней очистки (рис. 8.6).

Борьба с запыленностью

Пыль рассеивается воздушными потоками, если скорость их движения достаточно высока. Это происходит при обычном движении воздуха в рабочих помещениях, при перемещении людей, в результате конвекционных токов и других причин. Взвешенные в воздухе частицы пыли переносятся потоками воздуха. Используя этот эффект, можно управлять потоком частиц, перемещая их в желаемом направлении вместе с воздухом.

Борьба с запыленностью [1, 2] наиболее эффективна в том случае, когда источники пыли можно локализовать путем устройства камеры, вытяжных шкафов и различных укрытий; при этом уменьшается количество аспирируемого воздуха. С целью локализации источников пылевыделения следует по возможности изменять технологию производства. Если это сделать нельзя, то необходимо отсасывать воздух из производственного помещения в целом.

Открытые рабочие помещения. В обычных помещениях, где источники пылевыделения не оборудованы укрытиями, содержание частиц может достигать предельно допустимых концентраций, а иногда быть выше. Поэтому необходимо контролировать поток вентиляционного воздуха, который должен обеспечивать минимально допустимую кратность воздухообмена. Иногда кратность обмена рассчитывается для помещения высотой 3 *м*; если высота помещений больше, то в расчет вводится соответствующая поправка.

Движение воздуха от приточных насадков к вытяжным отверстиям должно происходить так, чтобы охватить всю площадь и удалить пыль из мест, где работают люди. При этом надо следить, чтобы не было ненужных завихрений воздуха и чтобы не поднималась пыль с пола и других поверхностей. Поток воздуха направляется или от работающего к его рабочему месту, или сверху вниз, но не наоборот, как это обычно бывает в помещениях, где не ведется борьба с пылью.

Воздух может направляться из более чистых зон в зоны с большей запыленностью, или из одного помещения в другое, или из помещения к укрытым местным отсосам. В зонах с большей запыленностью поддерживается большее разрежение.

Полы и стены рабочих помещений должны быть гладкими, чтобы можно было проводить тщательную уборку помещений.

Местные укрытия. Существуют два типа местных укрытий: полное ограждение (перчаточный бокс) и частичное (вытяжной шкаф или зонт). В первом случае место пылеобразования полностью окружено стенками, во втором — частично стенками и частично воздушным потоком. В обоих случаях преследуется одна цель — оградить источник пылеобразования и непрерывно удалять взвешенные частицы из закрытой зоны. Количество аспирируемого воздуха прямо пропорционально площади открытой поверхности, через которую проходит воздух. Более экономно расходуется воздух при полной изоляции источника пылеобразования.

Полные ограждения. Если в укрытии поддерживается только легкое разрежение (около 10 *мм вод. ст.* относительно окружающего пространства) и происходит незначительный подсос через соединения, уплотнения и т. д., то трудно обеспечить хорошее проветривание камеры. Для вентилирования полностью герметизированной защитной камеры можно использовать подачу воздуха или инертного газа, как при механической вентиляции рабочего помещения, причем очистка камеры малого объема производится более эффективно.

Перчаточные боксы являются типичными устройствами. Они широко используются в атомной промышленности [3] в тех случаях, когда необходимо не допускать попадания высокотоксичных радиоактивных аэрозолей таких элементов, как плутоний, в рабочие помещения. Обычно бокс представляет собой стальной или пластмассовый каркасный корпус прямоугольной формы с резиновыми перчатками и большими смотровыми стеклами, с форкамерой, не допускающей утечки пыли и служащей для размещения материалов и инструментов. Если нет необходимости постоянно поддерживать

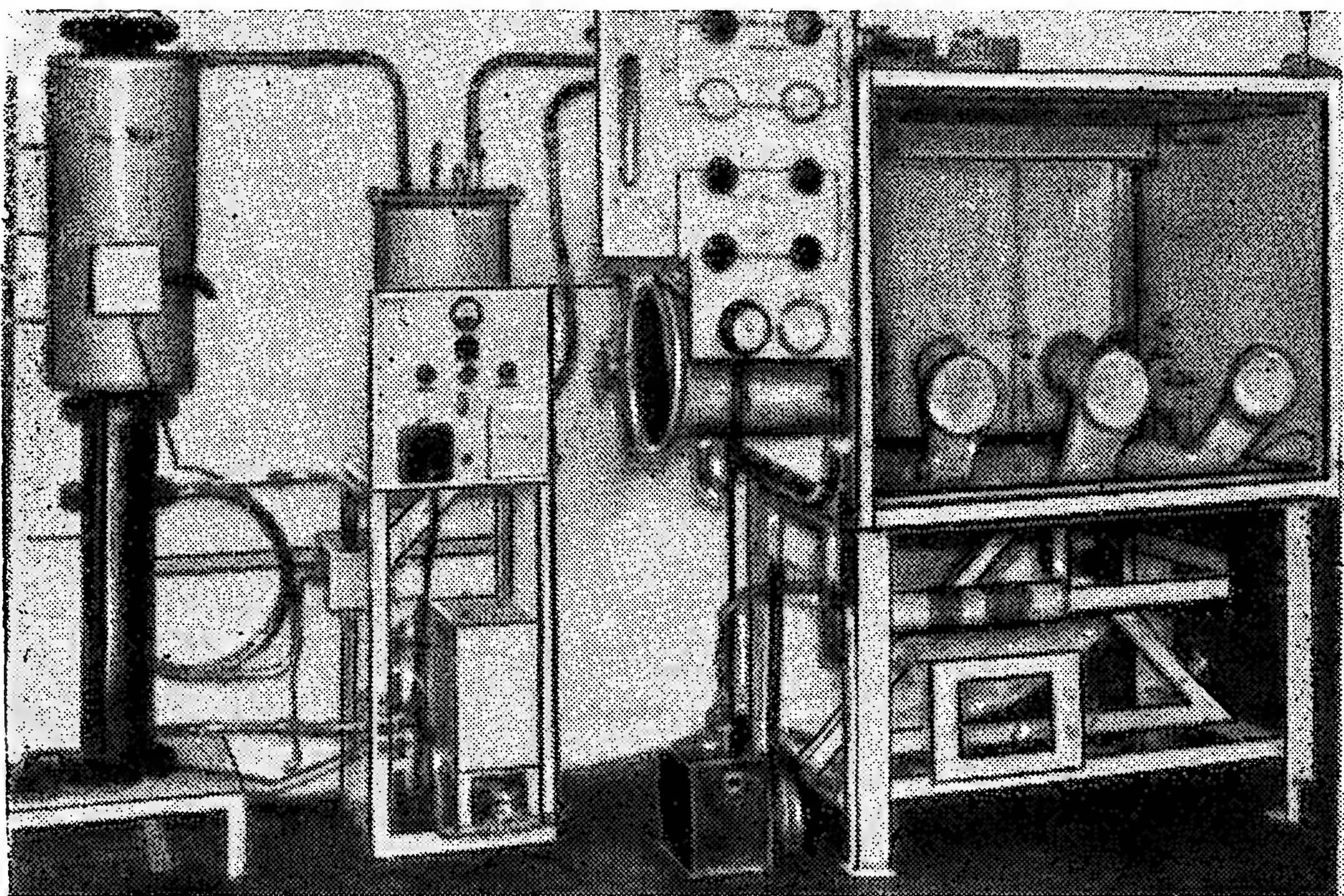


Рис. 8.7. Перчаточный бокс.

воздушный поток через бокс, то он присоединяется к вытяжной системе. В этом случае из бокса удаляется незначительное количество токсичной пыли.

Воздушный поток во всем объеме бокса создается нагнетательными и вытяжными перфорированными трубами-экранами, расположенными с противоположных боковых сторон камеры (рис. 8.7). Такая система позволяет удалить из бокса значительное количество пыли, однако крупные частицы пыли, оседающие в отверстиях, засоряют трубы-экраны. Чтобы этого не происходило, внутри бокса, непосредственно в местах пылевыделения, устанавливаются местные отсосы, входящие в высокоскоростную замкнутую систему циркуляции воздуха.

Эта система включает в себя насадок, циклон или рукавный фильтр и т. д. (вплоть до высокоэффективных фильтров), которые расположены снаружи. Очищенный воздух возвращается в бокс. Система может использоваться как самостоятельно, так и в сочетании с перфорированными экранами. Конструкции насадков для таких систем разработаны сравнительно недавно. Применение

полной защиты этого типа дает возможность заменить воздух другими газами, в особенности инертными, для удаления веществ химически активных, огнеопасных или вызывающих коррозию [4].

Частичные ограждения. Полного ограждения часто не требуется или оно просто неудобно для работы. Вытяжные шкафы и камеры вообще используются более широко, чем перчаточные боксы.



Рис. 8.8. Рабочее отделение.

При частичном укрытии герметичность камеры неполная, аэродинамический барьер, обеспечивающий защиту от выбросов вредностей, создается потоком воздуха, проходящим в проем.

Вытяжной шкаф состоит из рабочей поверхности (стола, верстака и т. д.), огражденной с трех сторон; через четвертую в шкаф снаружи поступает воздух (при включении вытяжного вентилятора). Площадь проема можно регулировать, но она должна быть такой, чтобы обеспечить достаточно высокую скорость потока для удаления любых частиц пыли или возгонов, рассеивающихся во все стороны в результате их собственного движения.

Камеры обычно закрыты с трех сторон, четвертая частично открыта с рабочей стороны. Обычно глубина камер больше, чем глубина шкафов. Часто они имеют достаточно широкий проход для рабочего (рис. 8.8).

Воздушные потоки в камерах и шкафах. В камерах и вытяжных шкафах имеется возможность «выброса» пыли наружу под действием воздушных потоков внутри шкафа и наружных потоков. Установлено, что при обычных условиях линейная скорость через проем должна быть порядка 0,75—1,0 *м/сек*. Такая скорость исключает выбросы. Таким образом, для шкафа шириной 0,9 *м* при проеме высотой 0,46 *м* расход воздуха составит 1500 $м^3/ч$.

Для камер достаточна линейная скорость 0,25—0,38 *м/сек*, если нет возмущений внутри кабины и если пыль малотоксична.

Для открытого проема размером $1{,}5\times 1{,}2$ *м* при линейной скорости воздуха 0,38 *м/сек* расход будет 2500 $м^3/ч$. Итак, для предотвращения выброса необходимы вполне определенные минимальные линейные скорости. Для отсоса воздуха важное значение имеет

форма насадки, так как турбулентное движение может вызвать местные противотоки даже при скорости, обычно достаточной для удаления активности.

Фоунтейн [5] экспериментальным путем нашел распространение скоростей в поперечных сечениях насадков различной формы, служащих для подачи воздуха в высокоактивные и взрывоопасные помещения (рис. 8.9). Средняя скорость во всех случаях составляла 0,46 *м/сек.*

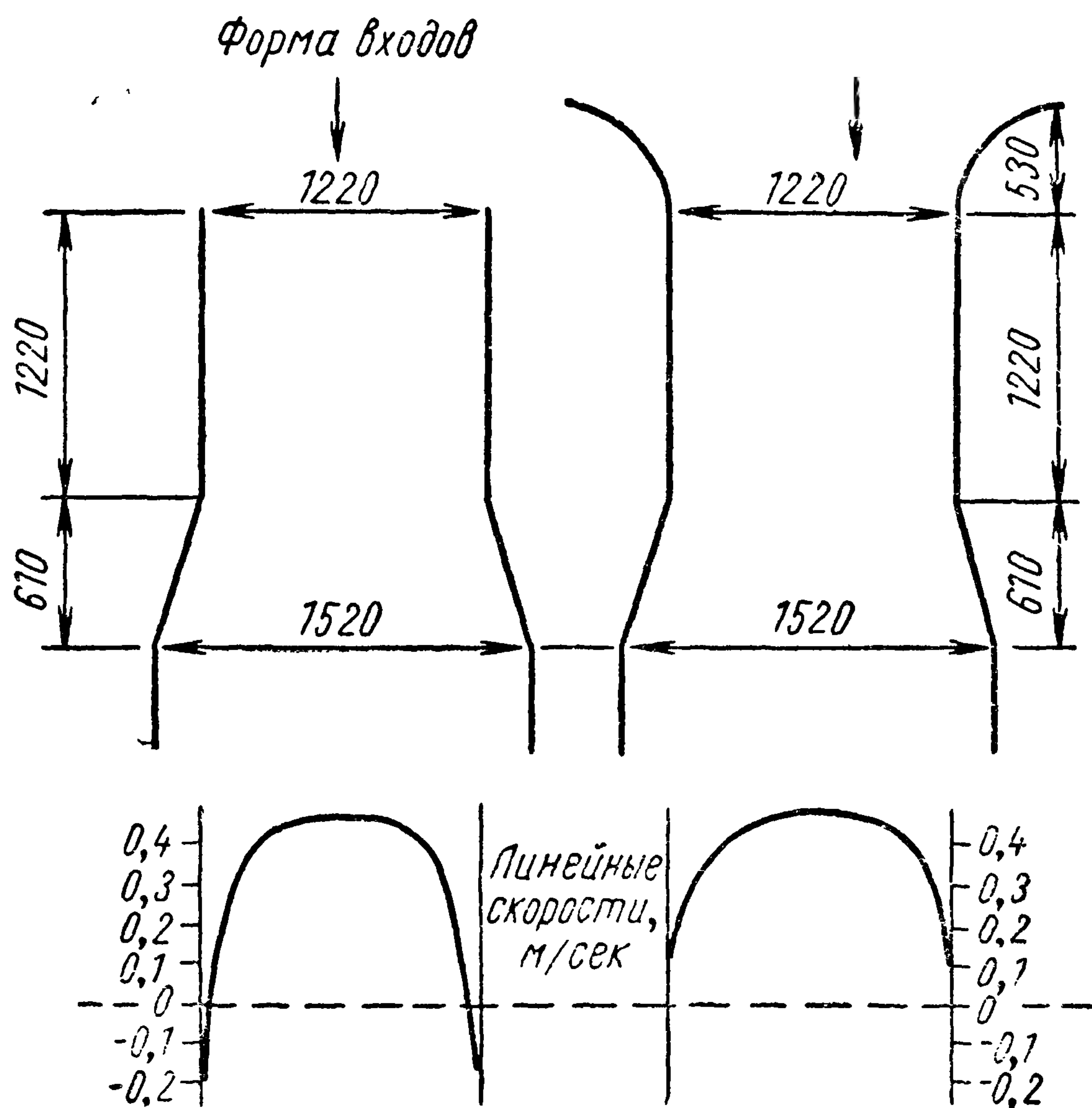


Рис. 8.9. Распределение скоростей для входов шлюзового типа.

Вытяжные зонты. Зонты располагаются в непосредственной близости от места пылевыделения для создания эффективного всестороннего аэродинамического барьера. Зона действия зонта определяется площадью, с которой отсасывается пыль.

Зонты обычно применяются для восходящих потоков; существуют и другие зонты, например для боковых отсосов травильной ванны, где происходит перекрестный отсос через горизонтальные прямоугольные щели, или для камеры очистки слитков, где создается нисходящий поток по направлению к решетке, расположенной под рабочим местом. Принципы действия всех зонтов одинаковы.

Соотношение расходов воздуха, необходимых для создания эффективного барьера при различных условиях, показано на рис. 8.10 [6].

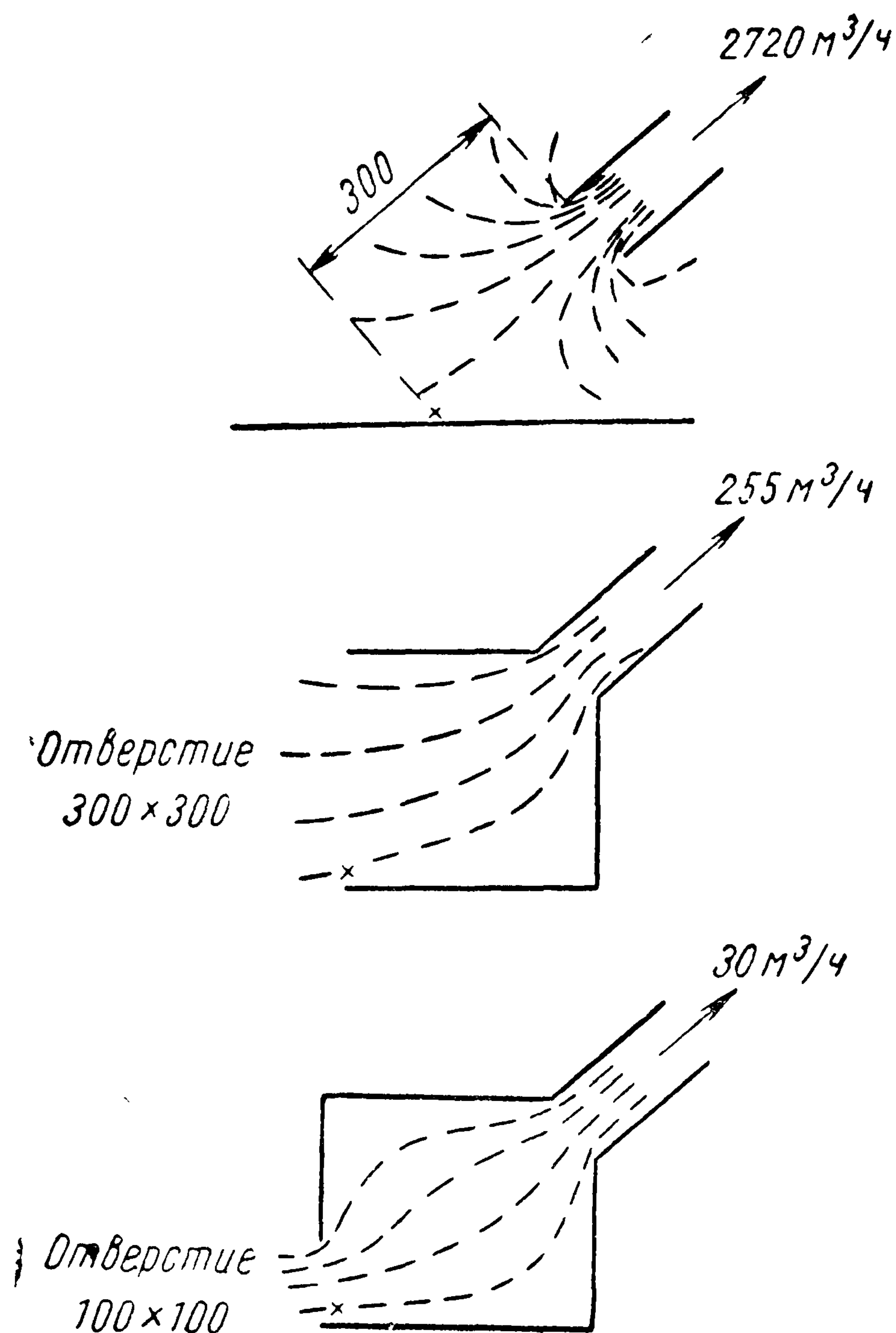


Рис. 8.10. Расход воздуха для различных типов ограждений.

Принципы проектирования насадков и зонтов [1, 2]

Частицы пыли перемещаются вместе с движущимся воздухом, поэтому распространение их зависит прежде всего от возмущений воздуха при различных процессах. Однако на определенном расстоянии от источника пылевыделения возмущения ослабевают и дальнейшее распространение пыли происходит за счет естественного перемещения окружающего воздуха; точка, в которой это происходит, называется нулевой. При использовании насадков и зонтов скорость отсоса в нулевой точке выше скорости потока окружающего воздуха.

Пылеотсасывающие устройства. Принцип работы пылеотсасывающих насадков и зонтов одинаковый. Насадки используются для небольших локализованных источников пылевыделения (например, для отсоса от резцовых головок металлорежущих станков), поэтому возможно применение насадков с малым размером отверстий. Это позволяет получить высокие скорости отсоса, обеспечивающие удаление пыли с поверхности, при относительно небольшом расходе воздуха.

Распределение воздушных потоков у зонтов и насадков. Скорость всасываемого воздуха изменяется в зависимости от расстояния. При круглом отверстии малого диаметра поток имеет почти сферическую форму, и скорость уменьшается пропорционально квадрату расстояния. При длинной узкой щели форма потока приближается к цилиндрической и скорость падает прямо пропорционально расстоянию (рис. 8.11). В каждом отдельном случае форма потока воздуха зависит от геометрии щели.

Для получения минимально эффективной скорости 0,25 *м/сек* на расстоянии двух диаметров от места отсоса с круглым отверстием скорость в его сечении должна быть порядка 15 *м/сек*. Для отверстия площадью 6,45 *см*^{2} расход воздуха составит 34 *м*^{3}/*ч*, для отверстия площадью 930 *см*^{2}—510 *м*^{3}/*ч*.

Расход воздуха можно уменьшить, если до отверстия установить плоскую заслонку. Это позволит снизить скорость потока в отверстии до 7,6 *м/сек* для поддержания скорости 0,25 *м/сек* на расстоянии двух диаметров от отверстия. Лучшие результаты дает вход конической формы.

При скорости воздуха в длинной узкой щели 15 *м/сек* скорость отсоса 0,25 *м/сек* достигается на расстоянии, в 9 раз превышающем

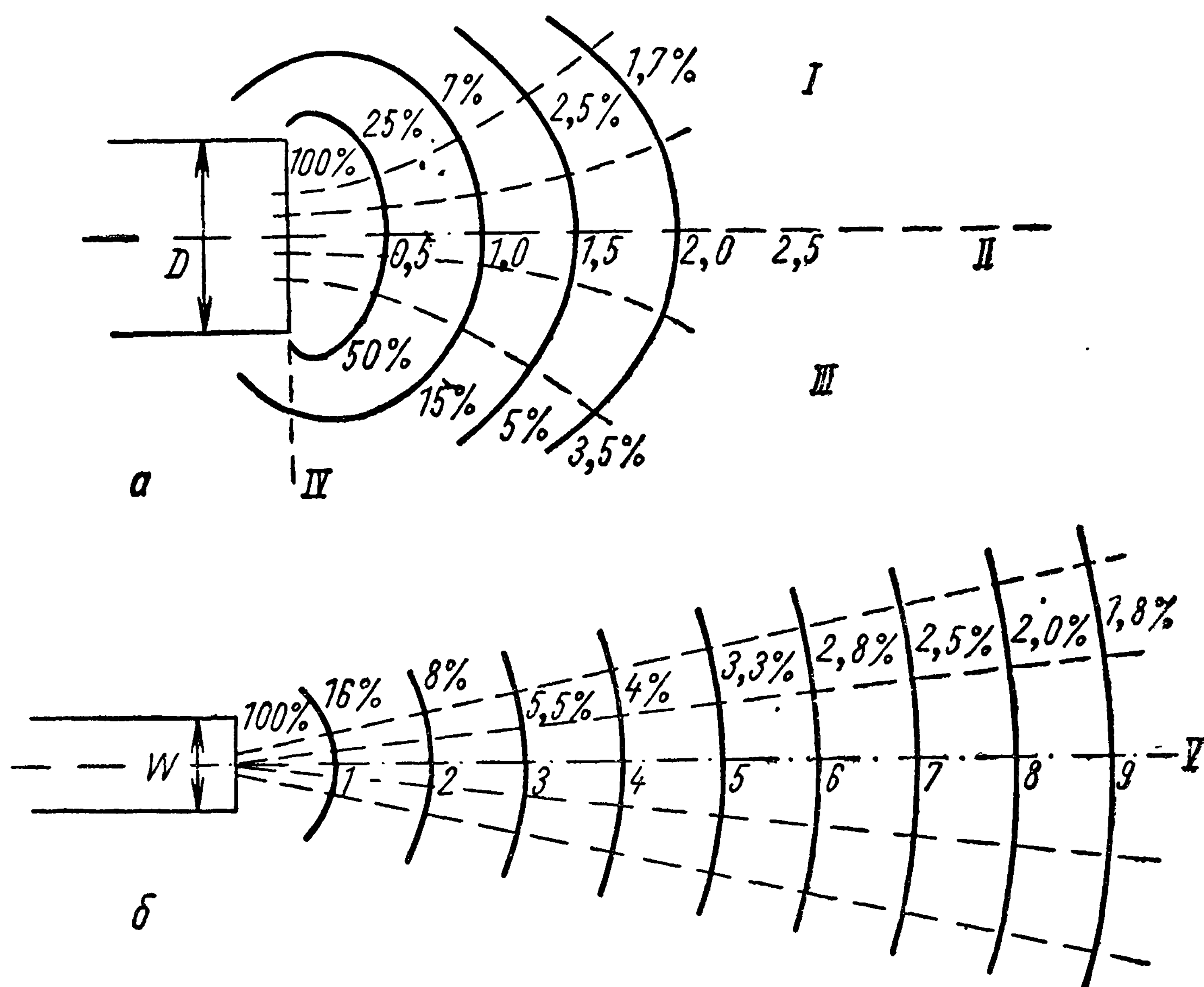


Рис. 8.11. Скорости воздуха в круглом (*а*) и прямоугольном (*б*) отверстиях:

I — поле линейных скоростей без экрана; II — число величин *D* (*D* — диаметр отверстия); III — поле линейных скоростей с плоским экраном; IV — плоский экран; V — число величин *W* (*W* — ширина щели). Цифры на кривых — процент скорости от первоначальной.

ширину щели. Очевидно, что насадок с узкой щелью более экономичен, чем насадок с круглой или квадратной формой отверстий. Это относится как к небольшим насадкам с отверстиями различной формы, так и к более крупным зонтам для верстаков, причем форма потока остается в сущности одинаковой независимо от размера.

Устройства для местной очистки воздуха. От локализованных источников пылевыделения через высокоскоростные насадки отсасывается воздух с высокой концентрацией пыли, содержащей крупные частицы. Основную массу этой пыли желательно улавливать до смешения ее с другими воздушными потоками, чтобы уменьшить нагрузку на основной фильтр. Для этого используются осадительные камеры, циклоны, тканевые фильтры и скрубберы; их часто устанавливают непосредственно у местных отсосов от металлооб-

рабатывающих станков и т. д. Типичная установка показана на рис. 8.12. После первичной очистки воздух, содержащий более мелкие частицы, направляется в фильтры тонкой очистки.

Устройство воздуховодов. Запыленный воздух из рабочих помещений и от местных отсосов (в некоторых случаях частично очищенный в первичных пылеуловителях) должен подводиться к фильтрующей установке, расположенной вне рабочих помещений. При про-

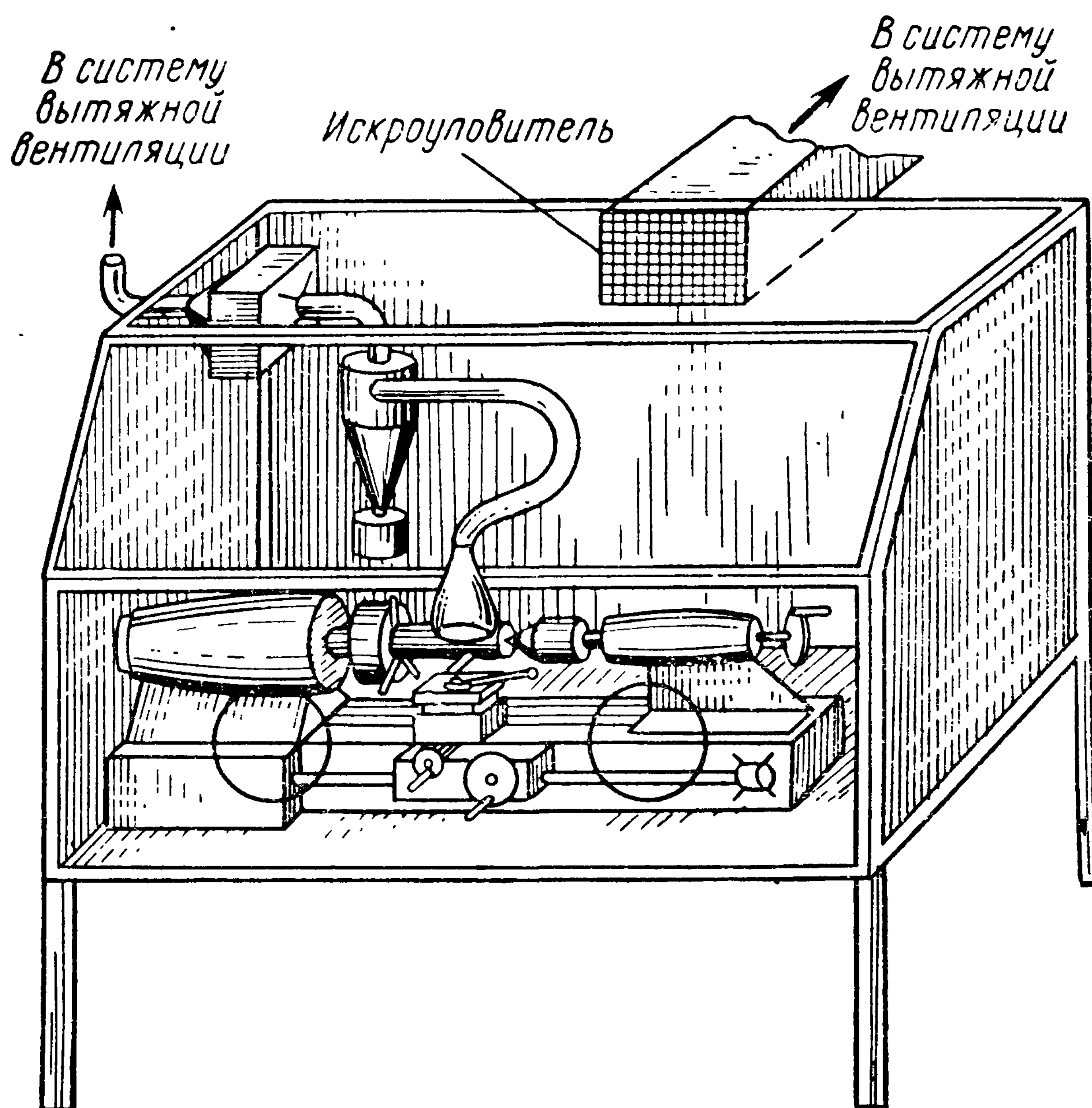


Рис. 8.12. Расположение местных пылеулавливающих устройств.

ектировании газоходов следует рассчитывать минимальную скорость воздуха и диаметры отводов и магистральных газоходов, что необходимо для поддержания таких скоростей в системе, при которых пыль не будет оседать на стенках газоходов. Вообще решение должно быть компромиссным: надо поддерживать такую минимальную скорость воздуха, чтобы, с одной стороны, избежать осаждения пыли в газоходах, и, с другой стороны, не допустить больших потерь давления. Однако слишком низкие скорости приводят к значительному удорожанию воздушных магистралей. Чтобы не происходило осаждения пыли, скорость воздуха в горизонтальных газоходах должна быть порядка 25 *м/сек* при наличии грубой тяжелой пыли и 5—10 *м/сек* для тонкой пыли, остающейся после местных пылеуловителей. В вертикальных газоходах, где вероятность осаждения частиц меньше, допустимы меньшие скорости.

Изменения размеров поперечных сечений и различные препятствия, неизбежные в любом газоходе, способствуют осаждению ча-

стиц пыли. Поэтому все колена, расширения и сужения должны быть тщательно спроектированы. В справочниках по вентиляции и отоплению приведены необходимые данные по этому вопросу. Основной принцип, которого следует придерживаться, — не допускать снижения скорости в любой точке газохода ниже начальной, с которой производится отсос пыли. Внутренние поверхности газоходов должны быть гладкими; шероховатость стенок способствует турбулизации потока и осаждению пыли.

Скорость в вертикальных газоходах обычно равна 2,5—3,8 *м/сек*. Размеры стояков в значительной мере определяются размерами шиберов; скорость воздуха и на этом участке не должна быть большой, чтобы обеспечить равномерный подвод газа к шиберу и предотвратить чрезмерный шум.

При проектировании газоходов вытяжной системы, в которой нет шиберов, рекомендуется, чтобы площадь сечения основного газохода была приблизительно на 20% больше суммы площадей отводов. Увеличение площади обеспечивает более равномерное распределение потока воздуха по сечению.

При наличии шиберов можно поддерживать равномерную скорость во всей системе, однако при проектировании вытяжных газоходов из различных рабочих помещений с последующим их объединением в магистральном газоходе, подводящем воздух к фильтрующей установке централизованной очистки и к вентилятору, следует по возможности делать все отводы одинаковой длины, чтобы свести до минимума количество шиберов для уравновешивания системы.

Скорость воздуха можно увеличить, если вентилятор расположить недалеко от места отсоса. Однако в этом случае придется установить больше шиберов на коротких отводах вблизи вентилятора. Преимущество высокоскоростной системы заключается в том, что можно несколько увеличить размеры газоходов от вытяжных решеток и тем самым снизить шум в рабочих помещениях. Площадь газохода будет почти равна площади приточного отверстия.

Скорость воздуха в магистральном газоходе следует принимать равной 6—9 *м/сек*, а через вытяжные решетки — в пределах 1,5—2,5 *м/сек*.

Разбавление воздуха или газа смешением. Воздух или газы, аспирируемые от различных рабочих мест производственных помещений, имеют различную запыленность. В некоторых случаях разбавление загрязненного воздуха большими объемами достаточно чистого воздуха устраняет необходимость установки фильтров для завершающей очистки. В других случаях разбавление воздуха с высокой концентрацией пыли чистым воздухом, не устраняя полностью завершающей очистки, позволяет снизить запыленность до такого уровня, что становится возможным применение обычных фильтрующих установок. Таким образом, при проектировании необходимо учитывать возможность смешения и разбавления различных воздушных потоков перед направлением их на установку завершающей очистки.

Соответствие характеристик предфильтров и конечных фильтров

Запыленность аспирируемого технологического воздуха или газов, направляемых для очистки в высокоэффективные фильтры, должна быть снижена до определенного уровня. Поэтому необходимо более детально рассмотреть условия применения предфильтров, способствующие продлению сроков эксплуатации конечных фильтров.

Забивание фильтров и время их службы. Типичные кривые зависимости сопротивления от количества накопленной пыли для различных фильтрующих материалов приведены в гл. IV.

После плавного начального участка обычно наблюдается резкое увеличение сопротивления при незначительном дополнительном поступлении пыли в фильтр. Обычно менее эффективные фильтрующие материалы отличаются большей пылеемкостью. Объемные волокнистые фильтры имеют бо̂льшую пылеемкость по сравнению с фильтрующими материалами типа бумаги при одинаковой эффективности для одинаковой пыли.

При скорости воздуха 1,5—2,5 *см/сек* высокоэффективные фильтры в начальный период работы имеют сопротивление приблизительно 25 *мм вод. ст.*; резкое возрастание сопротивления вследствие забивания фильтра обычно наступает при ΔP = 75—100 *мм вод. ст.* Начальное сопротивление предфильтров при скорости 2,5 — 10 *см/сек*, как правило, не превышает 12,5 *мм вод. ст.* Забивание пылью допускается до сопротивления 125—130 *мм вод. ст.* Однако опыт эксплуатации показал, что предельное сопротивление фильтрующей установки не должно превышать 125 *мм вод. ст.*, так как при дальнейшем накоплении пыли стоимость энергии, расходуемой вентилятором, становится чрезмерной.

Пылеемкость очень часто выражается в граммах на квадратный метр или в граммах на образец, хотя скорость забивания в действительности определяется объемом уловленной пыли. Атмосферная заводская пыль обычно состоит из смеси неорганических веществ и содержит только незначительную долю вредных примесей, которые необходимо уловить. Усредненный удельный вес такой пыли приблизительно равен двум. В тех случаях, когда улавливаемая пыль состоит в основном из тяжелых металлов, пылеемкость в граммах будет значительно больше.

Лабораторные испытания фильтрующей среды на пылеемкость часто вводят в заблуждение. Дело в том, что, во-первых, получают сильно отличающиеся результаты по различным видам пыли, и, во-вторых, складчатая конструкция фильтров не позволяет накапливать на единице поверхности такое количество пыли, которое собирается на поверхности материала, не имеющего складок. Следовательно, лучшим методом определения длительности непрерывной работы образцов фильтрующих установок являются опытно-промышленные испытания в реальных условиях эксплуатации.

Такие испытания могут дать особенно ценную информацию по забиванию в тех случаях, когда в аэрозолях содержатся частицы субмикронного размера. К сожалению, не всегда можно провести такие испытания.

Для атмосферной пыли вокруг заводов, расположенных в сельской местности, типична концентрация 0,05—0,07 *мг/м³*. Она может быть снижена фильтрами приточной вентиляции до 0,01 *мг/м³*. В чистых помещениях концентрации пыли бывают порядка 0,03 *мг/м³*, и можно полагать, что фильтры вытяжной вентиляции из рабочих помещений будут работать при запыленности воздуха 0,04 *мг/м³*.

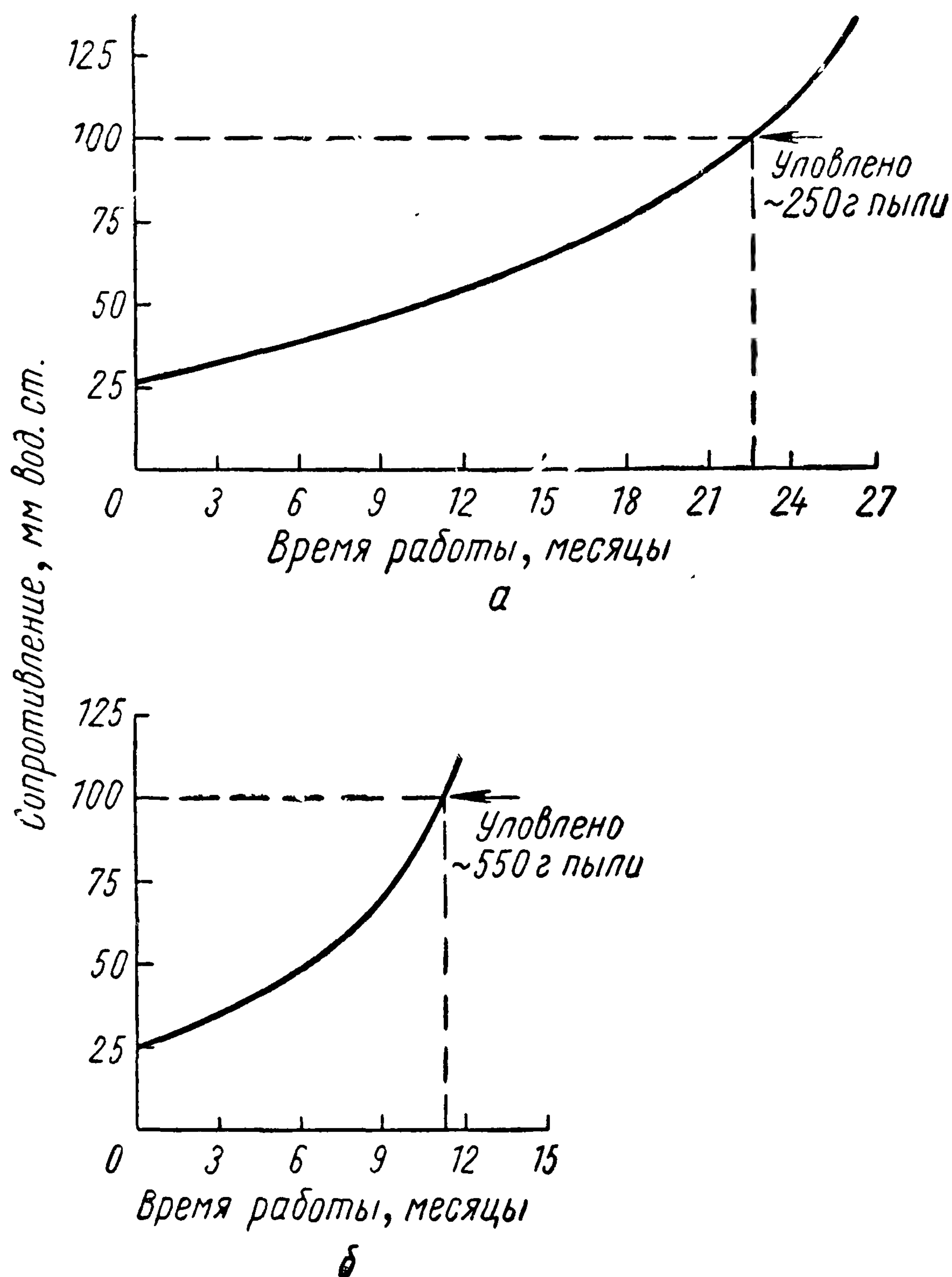


Рис. 8.13. Типичные кривые зависимостей ΔP от пылеемкости хлопко-асбестового фильтра при расходе воздуха 340 *м³/ч* (*а*) и бумажного фильтра при расходе воздуха 1700 *м³/ч*(*б*). В обоих случаях концентрация пыли 0,04 *мг/м³*.

На рис. 8.13 представлены типичные кривые забивания высокоэффективных фильтров, снаряженных различными материалами. Эти зависимости характеризуют сроки их эксплуатации без использования предфильтров.

На рис. 8.14 показан эффект забивания тех же высокоэффективных фильтров в комбинации с предфильтрами на основе стекловолокна. Так как основная часть пыли улавливается предфильтрами, то сопротивление конечного фильтра растет значительно медлен-

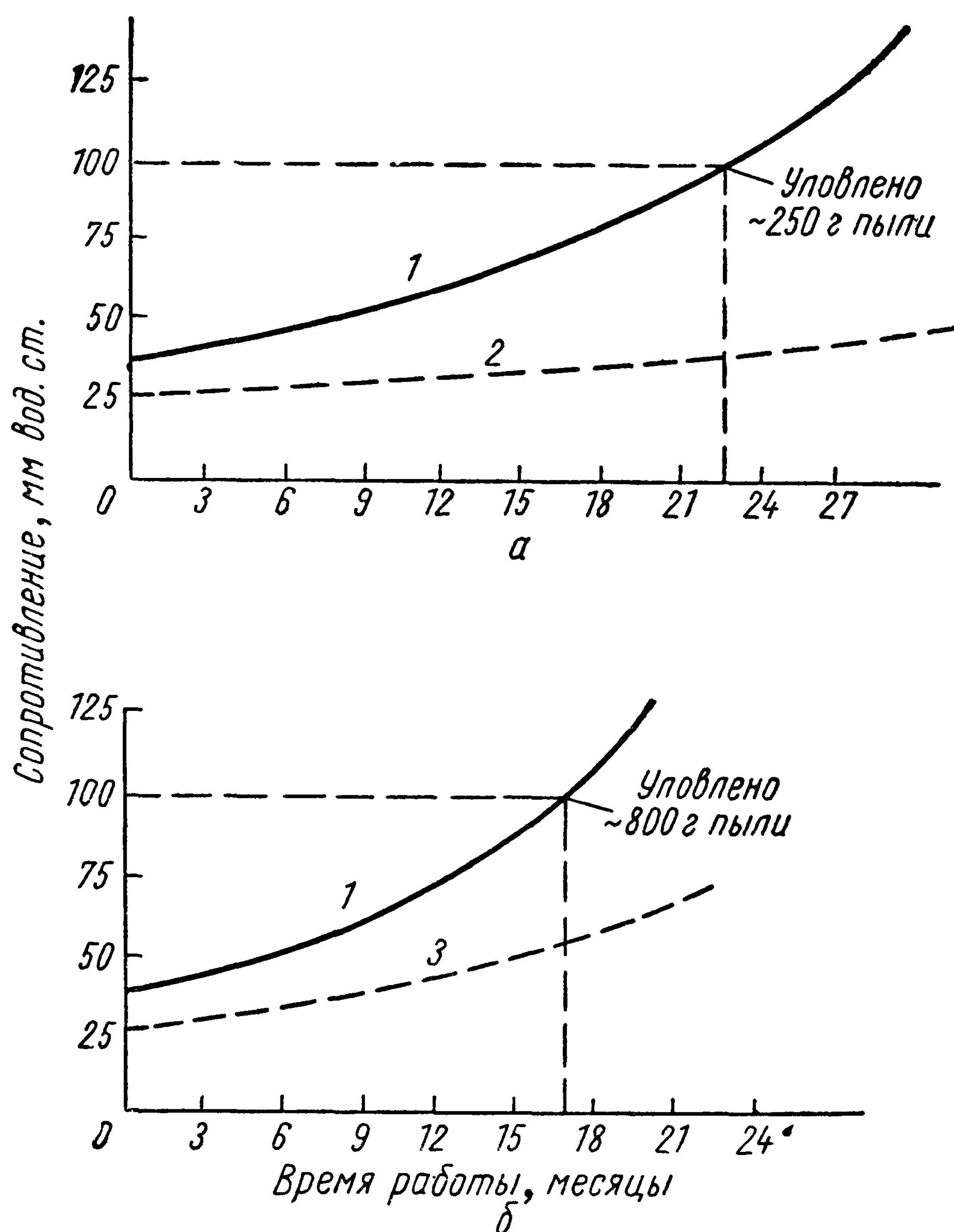


Рис. 8.14. Типичные кривые зависимостей ΔP от времени забивания хлопко-асбестового фильтра со стекловолокнистым предфильтром при расходе 340 $м^3/ч$ (*а*) и бумажного фильтра со стекловолокнистым предфильтром при расходе 1700 $м^3/ч$ (*б*). Концентрация пыли в обоих случаях 0,04 $мг/м^3$:

1 — всего фильтра; *2* — хлопко-асбестового фильтра; *3* — бумажного фильтра.

нее и срок его службы существенно удлиняется. Использование двухступенчатой фильтрации целесообразно в тех случаях, когда это экономически обосновано.

Выбор оптимальной конструкции предфильтров [7]. Для определения наиболее экономичной комбинации предфильтров с фильтрами тонкой очистки в конкретных условиях необходимо иметь методику расчетов. Такие расчеты должны учитывать пылеемкость высокоэффективных фильтров в момент забивания, кривые зависимостей сопротивления от пылевой нагрузки, коэффи-

циент проскока (усредненный, общий или по ступеням) и данные по стоимости фильтров.

Рассмотрим это на примере. Допустим, что фильтр тонкой очистки производительностью 1700 $м^3/ч$ имеет пылеемкость до момента забивания 300 *г*, стоимость его равна C_f.

Введем следующие обозначения: L — общее количество пыли, поступающее с воздухом в течение года; L_p — пылеемкость предфильтра; $C_p = \frac{1}{n}C_f$ — стоимость предфильтра в долях стоимости основного фильтра; x — доля пыли, проникающая через предфильтр.

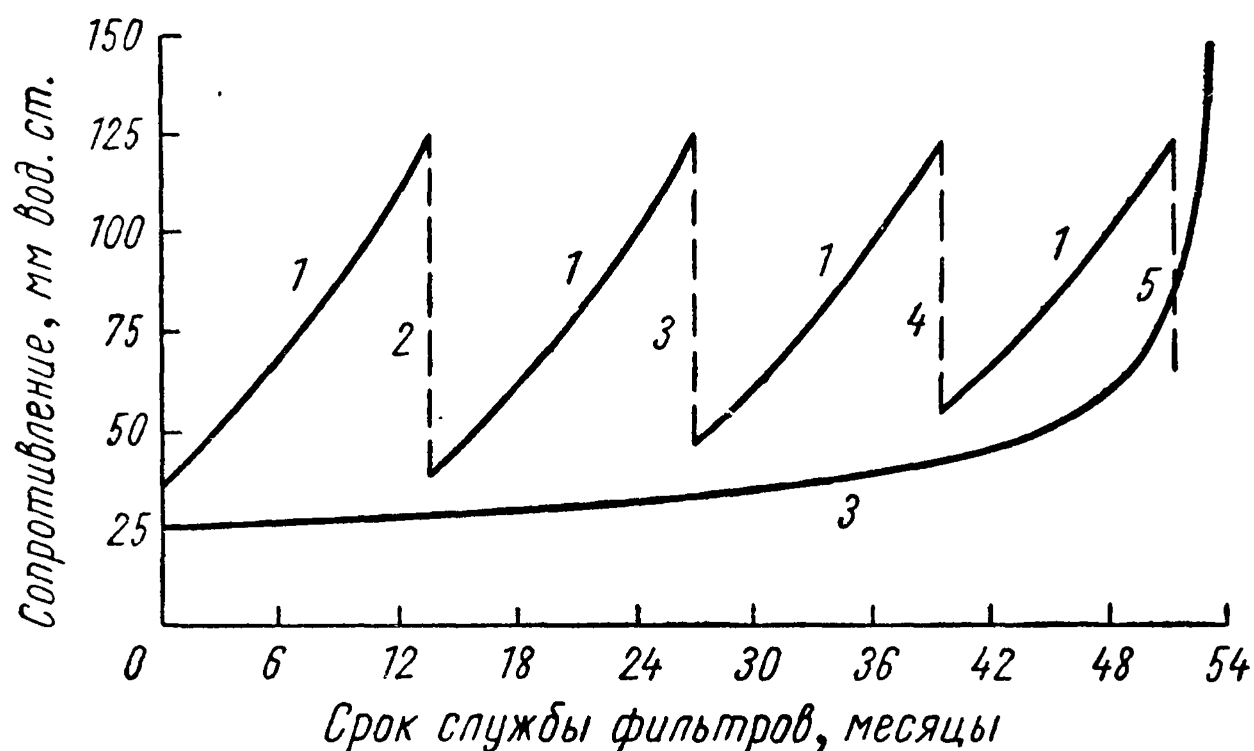


Рис. 8.15. Срок службы фильтра с оптимальным предфильтром:

1 — предфильтр и основной фильтр; *2, 3, 4, 5* — первый, второй, третий и четвертый предфильтры соответственно; *3* — основной фильтр.

Общая стоимость установки в год составит

$$\frac{L(1-x)C_p}{L_p} + \frac{C_f Lx}{300} = \frac{L(1-x)C_f}{L_p n} + \frac{C_f Lx}{300} = LC_f\left(\frac{1-x}{L_p n} + \frac{x}{300}\right).$$

Данные расчетов по этой формуле для различных значений L_p, $1/n$ и x следует представлять в виде таблицы и затем определять минимальную общую стоимость.

В табл. 8.1 приведены данные по пылеемкости и эффективности целого ряда образцов предфильтров, снаряженных стекловолокном. Результаты получены в лабораторных условиях с использованием аэрозоля метиленовой голубой. Ориентировочное значение пылеемкости предфильтра L_p можно получить на основе экспериментальных лабораторных исследований зависимости пылеемкости в расчете на единицу поверхности фильтрующей среды.

На рис. 8.15 представлены результаты, полученные при работе предфильтра и фильтра тонкой очистки. Иногда предфильтры заменяют 4—5 раз, прежде чем фильтр тонкой очистки забивается пылью до такой степени, что дальнейшее его использование становится не-

Таблица 8.1

Результаты лабораторных испытаний предфильтров на забивание аэрозолем метиленовой голубой (скорость фильтрации 4,5 *см/сек*)

Тип стекловолокна в предфильтре	Толщина слоя, *мм*		Вес, *г/м²*	$\Delta P_{нач}$, *мм вод.ст.*	$K_{нач}$, %	$K_{общ}$, % при ΔP, *мм вод. ст.*		Пылеемкость, *г/м²*, при ΔP, *мм вод. ст.*	
	рыхлого	спрессованного				50	100	50	100
Fine Crown 100	25	6	350	1,25	72	26,4	23,8	54	64
Ультратонкое, содержащее 17% смолы	12,5	6	126	1,5	18	8,2	7,0	66	76
Ультратонкое без связующего	12,5	6	127	0,75	29	6,9	5,8	55	65
Ультратонкое без связующего, 2 слоя	2·12,5	6	254	3	8,4	2,6	1,9	24	32
	2·12,5	12,5	254	4	21,6	2,9	2,4	61	75
Тонкое, второй слой волокно АА	25+12,5	6	450	4,5	4	0,26	0,23	32	38
Тонкое и ультратонкое	25+12,5	6	476	3,1	7,5	2,9	2,7	34	38
Ультратонкое типа *А*, содержащее 17% высокотемпературной смолы	25	6	204	1	36	7,5	6,3	41	52
Ультратонкое типа А, содержащее 6% высокотемпературной смолы	25	6	204	1,8	25	4,5	3,3	41	54
Ozonair 95	3	—	36	8	2,5	0,45	0,33	5,4	7,5
Aerosolve 95	6	6	43	3	2,5	0,89	0,71	43	54
	2·6	6	86	10	0,25	0,06	0,05	28	33
Renuglas	50	6	—	0,25	>90	—	—	—	—
Коэффициент проскока оставался большим									
Refrasil BR-1*	6	6	310	0,75	72	22,1	19,3	38	44

* Испытание проводилось по кварцевой пыли.

экономичным. Каждая последующая замена предфильтра производится через более короткие интервалы, если величина перепада давления всей системы остается на одном уровне.

Таким образом, применение предфильтров позволяет увеличить срок непрерывной работы фильтров тонкой очистки от 12 месяцев до 4 лет, при этом замена предфильтра производится один раз в год. Если стоимость предфильтра и фильтра тонкой очистки составляет соответственно 15 и 35 ф. ст., то общая экономия будет равна 45 ф. ст., что составляет около 1/3 стоимости установки без предфильтров.

Для нормальных условий эксплуатации высокоэффективных фильтров, оснащенных целлюлозно-асбестовой фильтрующей бумагой, наиболее подходящей фильтрующей средой для снаряжения предфильтров являются маты из стеклянных волокон с коэффициентом проскока по аэрозолю метиленовой голубой 90—95%. Стекловолокнистый мат укладывается глубокими складками, разделенными металлической гофрированной сеткой; скорость воздуха через фильтрующий материал — 5 *см/сек*, начальное сопротивление 12,5 *мм вод. ст.*

Следует еще раз напомнить, что выбор наиболее целесообразной комбинации предфильтр — фильтр тонкой очистки, проведенный с учетом запыленности воздуха, пылеемкости фильтров и усредненной во времени эффективности, будет удачным только в том случае, если фильтры оценивались по пыли, очень похожей по свойствам на реальную пыль. Вид пыли, использованной для испытаний, имеет существенное значение по следующим причинам.

1. Характер изменения сопротивления предфильтра и фильтра тонкой очистки с ростом пылевой нагрузки зависит от свойств пыли.

2. Эффективность предфильтра существенно изменяется по мере забивания его пылью, так что усредненная за все время эксплуатации степень очистки зависит от свойств пыли и продолжительности работы. Очевидно, что усредненная эффективность является более ценным показателем работы предфильтра, чем начальная эффективность.

3. Так как предфильтр будет улавливать в основном фракции более крупных частиц, составляющих основную долю пыли по весу, а тонкодисперсные частицы будут проникать через него, то коэффициент проскока будет зависеть от свойств исходной пыли.

Следовательно, характер забивания высокоэффективных фильтров будет изменяться с изменением вида пыли и характеристик предфильтров.

Выбросные трубы

Запыленный воздух, выпускаемый из трубы в атмосферу [8, 9], образует длинный факел конической формы, рассеиваемый в вертикальном и горизонтальном направлениях по мере удаления от точки выброса (рис. 8.16).

Концентрация пыли уменьшается при увеличении площади поперечного сечения дымовой струи. В любом поперечном сечении факела максимальная концентрация отмечается в его центре. Рассеивание струи в горизонтальном и вертикальном направлениях зависит от степени турбулентности окружающего воздуха, на которую, в свою очередь, влияет скорость ветра и температурный градиент воздуха (т. е. степень изменения температуры воздуха по высоте).

При нейтральных условиях с уменьшением плотности воздуха температура падает примерно на 2° С каждые 300 *м*. Однако при нагреве поверхности земли под действием солнечной радиации температурный градиент возрастает и рассеивание происходит более интенсивно. Вместе с тем, если верхние слои воздуха теплее нижних (обычно в вечернее время), то рассеивание восходящими потоками протекает медленнее и на определенной высоте, называемой линией инверсии, вообще прекращается. Когда факел дыма достигает этой высоты, его рассеивание по вертикали ограничивается уровнем земли и линией инверсии.

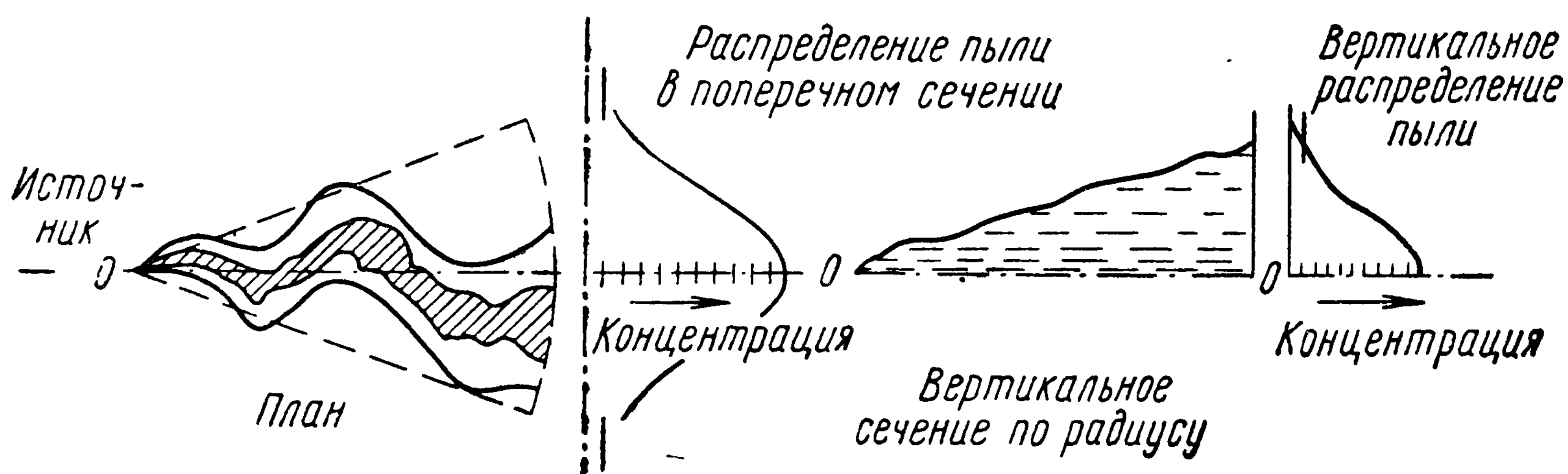


Рис. 8.16. Схема дымового факела.

При выбросе вредных веществ на уровне земли максимальные концентрации приходятся на ось струи. Их величину рассчитывают по уравнению

$$C = \frac{2,8 \cdot 10^{-3}\, x}{ud\theta h},$$

где C — концентрация на расстоянии d; x — начальное количество выбросов в 1 *мин*; u — скорость ветра; θ — горизонтальное расширение струи; h — вертикальное расширение струи.

Таким образом, концентрация по оси струи будет уменьшаться с удалением от точки выброса (рис. 8.17). Например, если начальная концентрация выбросов в воздух x (*г/м*^{3}) и количество выбрасываемого воздуха y (*м*^{3}*/мин*), т. е. xy (*г/мин*), то концентрация на расстоянии 100 *м* составит $2,5 \cdot 10^{-6}$ xy *г/м*^{3}; на расстоянии 1 *км* $7,5 \cdot 10^{-8}$ xy *г/м*^{3} и на расстоянии 10 *км* $1,1 \cdot 10^{-9}$ xy *г/м*^{3}. Следовательно, степень разбавления равна $2,5 \cdot 10^{-6}$ y; $7,5 \cdot 10^{-8}$ y и $1,1 \times \times 10^{-9}$ y соответственно.

Однако, если загрязненный воздух выбрасывается в трубу на высоте H, то концентрация примесей на уровне земли будет уменьшаться по мере приближения к трубе, а с определенного расстояния будет снова увеличиваться. При вертикальном рассеивании после выброса через трубу влияние начальной концентрации постепенно падает. Таким образом, концентрация примесей на уровне земли достигает максимального значения на некотором расстоянии от трубы, определяемом высотой трубы. Величина максимальной концентрации обратно пропорциональна квадрату высоты трубы и наблюдается на расстоянии, превышающем высоту трубы в 5—10 раз.

Для трубы высотой 100 *м* (см. рис. 8.17) при нейтральных условиях максимальная концентрация составит $2 \cdot 10^{-8}$ *ху г/м*^{3} на расстоянии приблизительно 1,2 *км* от трубы и менее 10^{-10} *ху г/м*^{3} на расстоянии 400 *м*, где эффект разбавления равен $2 \cdot 10^{-8}y$. При инверсионных условиях максимальная концентрация достигает бо̀льших значений, но расстояния от трубы до мест максимальных концентраций остаются примерно теми же, что и ранее.

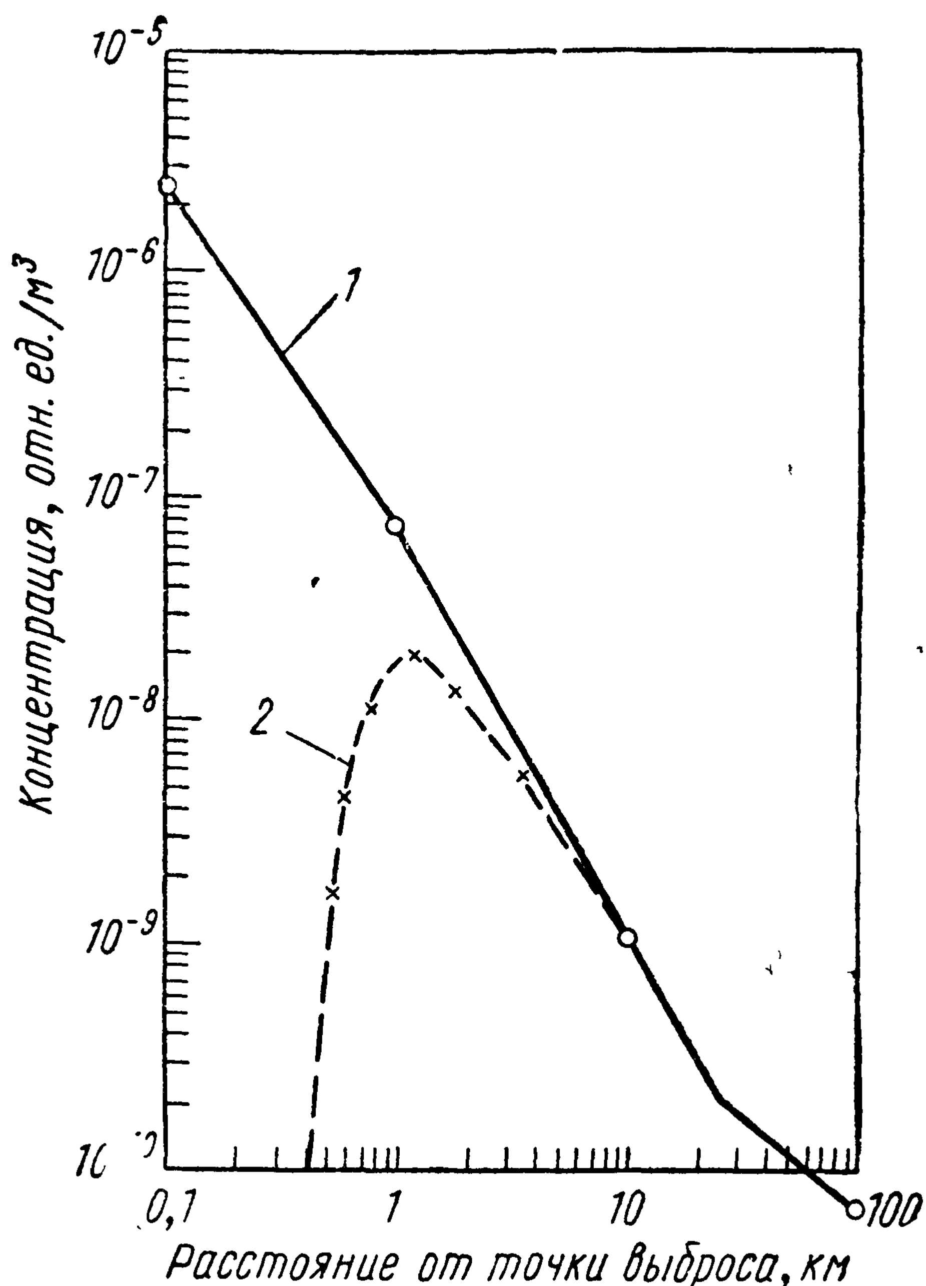


Рис. 8.17. Изменение концентрации пыли в зависимости от расстояния от точки выброса и высоты труб:

1 — выброс на уровне земли; *2* — выброс на высоте 100 *м*.

Рассеивание вредных примесей в атмосфере при помощи трубы практически не может быть полностью использовано по двум причинам: во-первых, в условиях инверсии степень разбавления может уменьшаться в 50—100 раз; во-вторых, в случае аварии выбрасываются очень большие количества вредных примесей. Вследствие этого разбавление примесей в атмосфере посредством дымовых труб при расчете систем очистки — это только резерв; безопасная концентрация выбросов должна обеспечиваться высокоэффективными фильтрами.

Все сказанное относится к рассеиванию взвешенных частиц в результате вихревой диффузии и турбулентности воздуха и не относится к гравитационному оседанию, так как частицы, прошедшие через высокоэффективные фильтры, имеют размеры меньше микрона.

Централизованная очистка

Воздушные потоки от различных местных вентиляционных систем, частично очищенные в первичных пылеуловителях, объединяются в центральную вытяжную систему и направляются на централизованную очистку. Требуется определить необходимость и степень окончательной очистки от радиоактивных или токсичных аэрозолей.

Если активность или токсичность в воздухе от местных вентиляционных систем такова, что на централизованной станции очистки требуется снизить концентрацию в 10^3 раз ($\eta = 99{,}9\%$) или даже в 10^5—10^6 раз ($\eta = 99{,}999$— $99{,}9999\%$), то необходимо использовать высокоэффективные фильтры.

В гл. V указывалось, что высокоэффективные фильтры в одну ступень имеют эффективность по аэрозолю метиленовой голубой 99,95% или 99,999% в зависимости от используемой фильтрующей среды, причем максимальная эффективность бумажного фильтра обычно не превышает 99,99%, а хлопко-асбестового — 99,999%.

В некоторых случаях для получения требуемой эффективности приходится устанавливать два или несколько фильтров последовательно, а иногда бывает достаточно установить предфильтр в сочетании с высокоэффективным фильтром.

Определив комбинацию фильтров, обеспечивающую требуемую эффективность, решают вопрос о наиболее рациональном размещении их в установке. Например, один корпус может быть снаряжен несколькими одинаковыми последовательно расположенными фильтрами или предфильтрами и одним основным фильтром. Возможно также последовательное раздельное размещение фильтров. Например, предфильтры или фильтры тонкой очистки могут устанавливаться непосредственно у источника пылевыделения (допустим, на вытяжном шкафу), а последующая ступень будет размещаться на некотором расстоянии от станции централизованной обработки, где смешиваются различные воздушные потоки. Далее будет показано, что последнему способу обычно отдается предпочтение.

Основные схемы очистки

Учитывая приведенные выше соображения, можно разработать принципиальную технологическую схему контролируемой фильтрации для всего здания, в котором образуются активные или токсичные аэрозоли. Одна из типичных схем приведена на рис. 8.18. На ней показаны рабочие помещения, в которых для отдельных операций требуются специальные укрытия и местные отсосы, направления потоков воздуха из одного помещения в другие, что обеспечивает его рациональное использование; указаны случаи применения обычных местных пылеулавливающих аппаратов или предфильтров и фильтров тонкой очистки. В каждом конкретном случае схема должна учитывать особенности технологических операций.

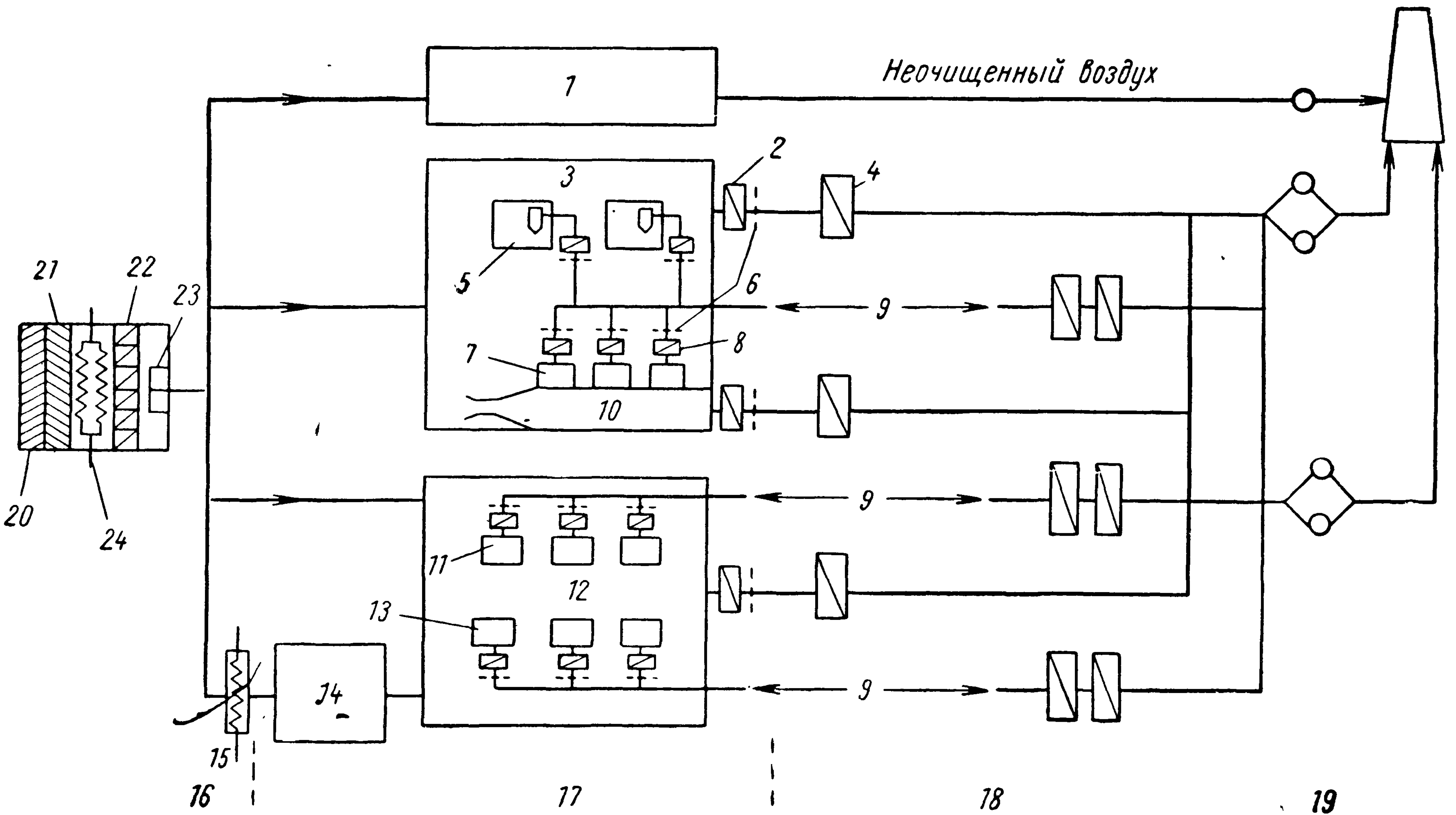


Рис. 8.18. Принципиальная технологическая схема фильтрующей установки:

1 — лаборатории с малоопасной пылью; *2* — искроуловитель или предфильтр; *3* — металлургические лаборатории; *4* — высокоэффективные фильтры; *5* — станочные боксы с циклонами; *6* — искрозащитные решетки; *7* — камеры с высокой активностью; *8* — местные фильтры с искроуловителями; *9* — разделительное пространство; *10* — шлюз; *11* — вытяжные шкафы; *12* — химические лаборатории; *13* — перчаточные боксы; *14* — комната для переодевания; *15* — дополнительный подогреватель; *16* — приточная система; *17* — производственные помещения; *18* — помещение для фильтрующей установки; *19* — вентиляционная камера; *20* — жалюзи; *21* — сетка для улавливания летучего мусора; *22* — фильтры; *23* — вентиляторы; *24* — подогреватели.

Учет влияния физических условий

При разработке и проектировании фильтров и целых установок следует всегда учитывать температуру, давление, влажность и другие физические условия как при работе в нормальной обстановке, так и в аварийных режимах (при пожаре, взрыве и других критических обстоятельствах).

Температура. Повышение температуры воздуха может оказывать влияние на рабочие характеристики фильтров.

1. Повреждение фильтрующего материала ведет к снижению эффективности очистки или к полной ее потере; резкие колебания температуры могут и не влиять на величину остаточной эффективности, когда температура снова станет нормальной.

2. Изменение эффективности улавливания аэрозольных частиц может быть связано с увеличением вязкости газов при повышении температуры. Однако результаты испытаний, проведенные для оценки этого влияния на стекловолокнистых бумагах, показали незначительное изменение эффективности осаждения вплоть до температуры разрушения стекловолокна ($t = 450°$ C). Причем при охлаждении эффективность полностью восстановилась.

В системах с высокой температурой неприменимы резиновые уплотнения, пластмассовые газоходы, антикоррозионные покрытия и т. д. Вентиляторы также не должны подвергаться воздействию высокой температуры. Для их защиты устанавливаются аварийные заслонки.

Давление и перепад давлений на фильтрах. Фильтры, снаряженные волокнистыми матами или бумагами, обычно рассчитаны на работу при атмосферном давлении и невысоком перепаде давлений. Повышенные абсолютные давления не влияют на коэффициент проскока, но в этих случаях (например, при очистке аэрозолей в системах рециркуляции газов ядерных реакторов) фильтры следует рассчитывать для работы под давлением. Керамические и металлокерамические фильтрующие элементы, выдерживающие значительно большие перепады давлений по сравнению с волокнистыми фильтрами, можно использовать в тех случаях, когда не требуется очень высокая эффективность очистки.

При чрезмерном накоплении пыли на фильтрующих поверхностях вполне возможно разрушение слоевых или бумажных фильтров, так как перепад давления может превысить допустимую величину. Максимально допустимый перепад давлений для тонких материалов, использующихся в компактных складчатых бумажных фильтрах, составляет 250—300 *мм вод. ст.*, но обычно не превышает 75—100 *мм вод. ст.* Для грубоволокнистых предфильтров верхним пределом перепада давлений является 150 *мм вод. ст.*

В Гарвардской лаборатории очистки воздуха исследовали воздействие продувки воздухом давлением 0,07—0,22 *кг/см*^{2} на различные фильтры, используемые для улавливания аэрозолей в системах циркуляции ядерных реакторов [10]. Типичные бумажные фильтры

выдержали такие давления, причем лучшие результаты показали стекловолокнистые фильтры. Однако наблюдалось значительное перемещение пыли и унос ее за фильтры. Это явление значительно сглаживалось при применении проволочных сеток или предфильтров в качестве опоры для высокоэффективных материалов.

Влажность. Фильтрующие материалы на основе целлюлозы разрушаются при относительной влажности свыше 80%, на основе стекловолокна они удовлетворительно работают при 100%-ной влажности (см. гл. IV). Обычно стараются не фильтровать воздух с влажностью 100%, контролируя температуру. Этот способ проще, чем подсушивание газа.

Пары кислот. Если возможно появление паров кислот, например, из вытяжных шкафов, то все оборудование вентиляционной системы должно быть кислотостойким. Фильтрующая среда и корпус фильтра изготовляются из пластмасс, а воздуховоды — из пластмасс и нержавеющей стали.

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Основной целью возведения фильтрующих вытяжных систем является предотвращение распространения очень опасных для здоровья людей веществ, поэтому необходимо знать, как ведут себя эти вещества в системах фильтрации при нормальных условиях работы (включая необходимые работы по обслуживанию) и в аварийных режимах (при пожаре, взрыве и т. д.). Следует отметить, что в эксплуатации очень сложно провести соответствующие испытания установленных фильтров, поэтому в системах, к которым предъявляются очень жесткие требования с точки зрения надежного обеспечения безопасности, в качестве последней ступени многоступенчатой схемы целесообразно использовать коробчатые фильтры. В этих фильтрах среда надежно фиксирована; они испытываются перед отправкой потребителю, а смена фильтра производится при забивании фильтрующей среды.

Особенно важно предотвратить распространение вредных веществ при смене фильтра как при замене фильтрующей среды, так и всего фильтра.

Опасность пожара и взрыва

Выход из строя в результате аварии (например, при пожаре) фильтрующей системы, предназначенной для очистки воздуха от высокотоксичных или высокорадиоактивных аэрозолей, может привести к тяжелым последствиям. Поэтому при проектировании принимаются строгие меры предосторожности, чтобы впоследствии исключить любые случайности.

Скопление пыли в системе очистки опасно возможностью воспламенения, так как часть пыли обычно органического происхождения, а во многих процессах выделяется металлическая пыль, от-

личающаяся высокой пирофорностью. Пожар может также возникнуть в рабочих помещениях, в вытяжных шкафах, в боксах, из которых отсасывается воздух. Причиной пожара может быть воспламенение растворителей, особенно при вытяжке газов из отдельных боксов или шкафов, в которых отсутствует достаточное разбавление воздухом, а температура выходящих газов может превысить 1000° С.

Возгорание металлической пыли ведет к нагреву воздуха до высокой температуры, а это может вызвать нагрев всего отсасываемого воздуха в вытяжной системе. В этом случае в систему очистки могут попасть горячие частицы или горячие газы и пламя. В обоих случаях может произойти разрушение фильтров или воспламенение пыли в газоходах и фильтрах.

Взрывы могут происходить в вытяжных системах от воспламенения пыли, паров растворителей или негорючих газов, которые при смешении с воздухом образуют взрывоопасные составы. Действие взрыва на систему очистки может быть двояким: во-первых, высокие давления и ударные волны могут привести к механическому разрушению фильтров; во-вторых, чрезмерная температура может привести к разрушению фильтрующей среды.

Высокая влажность, которая также вызывает разрушение среды, может возникнуть при тушении пожара водой.

Искроуловители

Проблема защиты от горячих частиц решается довольно легко, так как существуют материалы, весьма эффективно улавливающие раскаленные твердые частицы. Это так называемые искроуловители (не путать с огнепреградителями).

Стекловолокно — один из лучших и наиболее экономичных материалов для этих целей. Слой грубого стекловолокна, обладающий очень низкой эффективностью по пыли, удовлетворительно улавливает раскаленные частицы, размер которых позволяет им значительное время сохранять высокую температуру, способную разрушить фильтрующую среду. Свободно уложенное стекловолокно при толщине слоя 50 *мм* и лобовой скорости 1,5 *м/сек* помещают на входе вытяжных газоходов в тех местах, где могут возникнуть искры (боксы для механических работ, места сварки и разливки металла). Стекловолокнистые слои такого типа недороги и имеют низкое сопротивление (рис. 8.19). Их можно

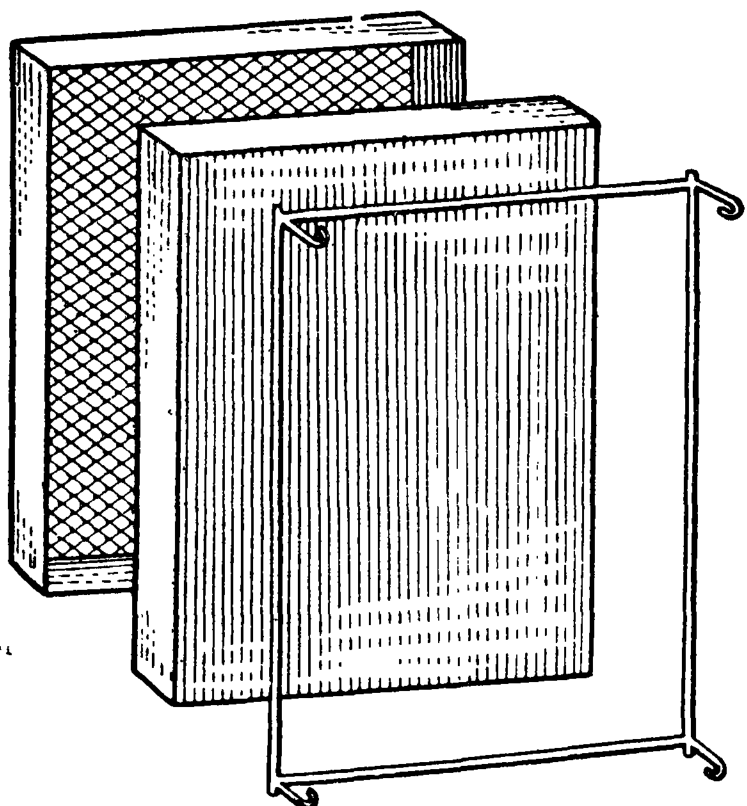


Рис. 8.19 Искроуловитель.

применять в качестве искроуловителей в виде первой ступени комбинированного фильтра. Предфильтры, снаряжаемые стекловолокнистыми матами, сами выполняют функции искроуловителей. Если пыль пирофорна, то за предфильтром желательно установить искроулавливающую сетку с отверстиями размером 0,42 *мм* из стальной проволоки, так как в случае воспламенения уловленной пыли и разрушения предфильтра горящие частицы попадут по газоходу к основному фильтру. Не следует применять в качестве искроуловителей слой стальной «ваты»: металл в такой форме при благоприятных обстоятельствах обладает способностью воспламеняться.

Огнепреградители

Пламегашение представляет собой более серьезную проблему. Промышленные огнепреградители могут удовлетворительно эксплуатироваться лишь при некоторых условиях и в течение весьма короткого промежутка времени. Например, при обычном режиме работы промышленный огнепреградитель Деви (медная сетка) оказывает относительно слабое действие на пламя при удалении воздуха из вытяжного шкафа, в котором воспламенились пары растворителей.

Проведены испытания более крупных огнепреградителей трубчатого типа для секций, в которых проводится работа с растворителями. Установлено, что огнепреградитель обеспечивает двухминутную задержку пламени (при скорости 1,3 *м/сек* в квадратном газоходе площадью 0,1 $м^2$).

Охлаждение горячих газов в газоходах

Наиболее простыми способами охлаждения газов являются разбавление их другими воздушными потоками и охлаждение в длинных газоходах.

При достаточном удалении фильтров горячие газы охлаждаются, отдавая тепло стенкам газохода. Длина газоходов, необходимая для достижения требуемого снижения температуры, подсчитывается и проверяется экспериментальным путем.

Предположим, что через газоход диаметром 300 *мм* проходит 1700 $м^3/ч$ газа с температурой 1000° С. Повышенная температура обычно наблюдается в течение коротких промежутков времени, обычно в течение 1—2 *мин*. Кривая, приведенная на рис. 8.20, позволяет оценить длину круглого прямого газохода с толщиной стальных стенок 1,6 *мм*, необходимую для охлаждения воздуха при неизменных внешних условиях. Однако результаты зависят от формы поперечного сечения, конфигурации и чистоты поверхности газоходов, от внешних температурных условий и т. д. Из графика видно, что для охлаждения газов до 450° С требуется газоход длиной порядка 30—40 *м*.

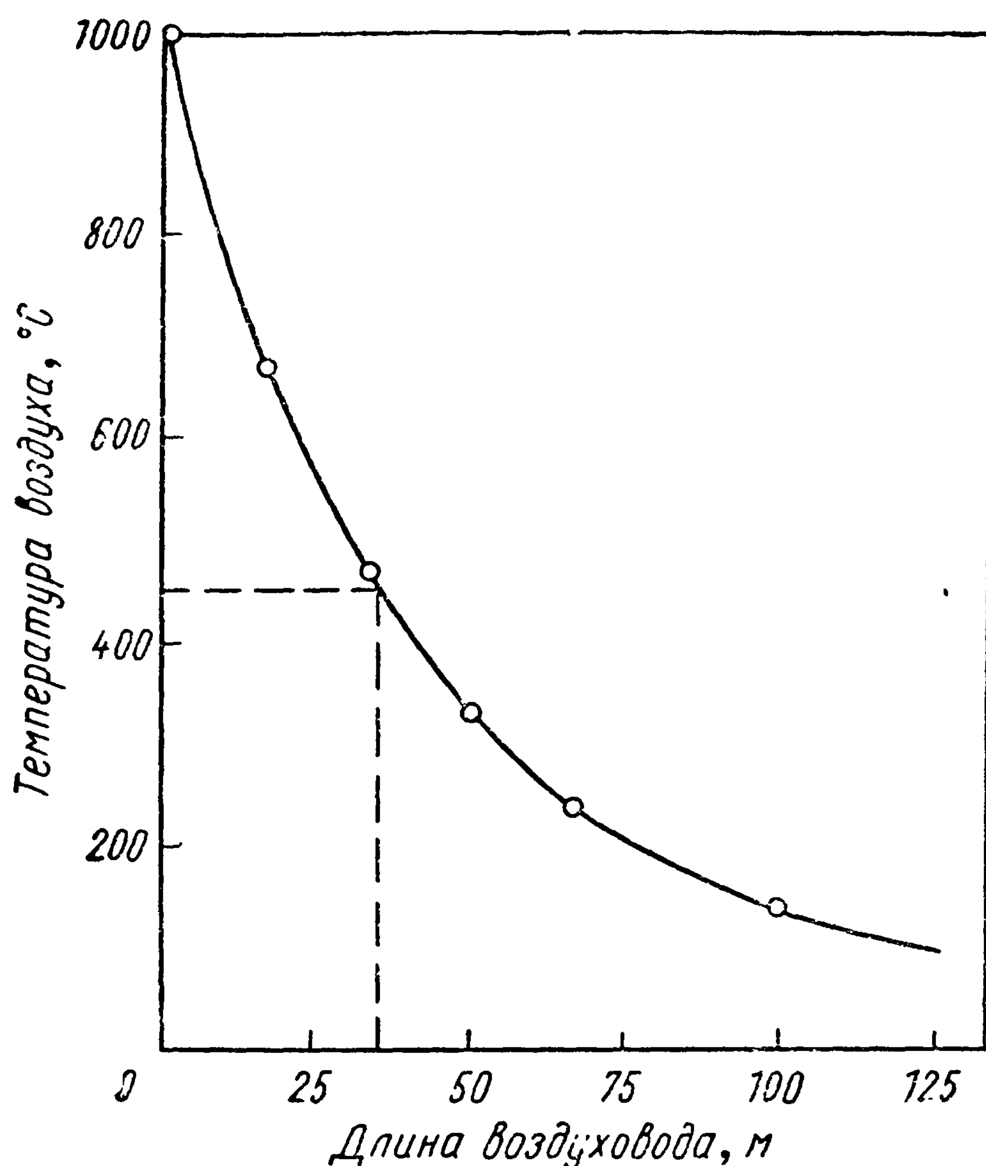


Рис. 8.20. Длина воздуховода для охлаждения воздуха в зависимости от его температуры.

Другим типичным случаем может быть расход газа 80 *м*³/*ч* через газоход диаметром 100 *мм*, например отсос из укрытия (перчаточного бокса). При температуре газа на входе в газоход 1000° С расстояние, на котором газ охлаждается до 450° С, должно составлять 7,5—9,0 *м*.

Воспламенение фильтров

При горючем фильтрующем материале наличие в фильтре пыли с низкой температурой воспламенения является опасным. Аэрозоли, возникающие в некоторых процессах при производстве бериллия, содержат органическую, неорганическую и металлическую пыль, температура воспламенения которой ниже 200° С. Искры с невысокой температурой могут вызвать воспламенение пыли. Если фильтр снаряжен асбесто-хлопковым материалом, то может произойти полное разрушение среды и возгорание самого фильтра. В этих условиях, если температура газа превышает 1000° С, происходит сгорание металлической пыли со значительным выделением тепла; возможно возгорание алюминиевых разделителей в фильтре, т. е. полнейшее разрушение фильтра. Если материал фильтра негорючий (например, стеклянная бумага) и рядом с ним не расположены предфильтры с горючей средой, то при забивании фильтра указанной выше пылью воспламенение нежелательно, так как при этом температура возрастет настолько, что или загорится металлический порошок или разрушится фильтр.

Экспериментами показано, что даже при скоплении в фильтре только металлической пыли (например, магниевой) и искусственном воспламенении температура воздуха не достигает 500° С, и, хотя происходит изменение структуры среды, эффективность фильтра остается достаточно высокой.

Методы борьбы с огнем

Полностью устранить возможность возникновения пожара в вытяжных системах нельзя, поэтому желательно изолировать часть системы очистки, в которой может произойти воспламенение, на-

пример шиберами, и предотвратить таким образом распространение огня на другие аппараты системы.

Эти шибера используются только при авариях. В качестве крайней меры можно предложить отключение основного вентилятора. Расстояние от фильтра до места возможного появления огня должно выбираться с таким расчетом, чтобы обеспечить время для выполнения аварийных работ. В фильтрующих системах следует использовать соответствующие методы для определения момента воспламенения. В основе большей части методов лежит наблюдение за температурой воздуха.

Для тушения загоревшихся фильтров в газоходе вблизи фильтра следует делать люки, через которые вводится пожарный рукав или устанавливаются автоматические разбрызгиватели.

РАСПОЛОЖЕНИЕ И МОНТАЖ ФИЛЬТРОВ

Газоходы, через которые отсасывается воздух из различных точек, проходят по производственным помещениям (лучше, если вне их) под потолком или по чердаку; отдельные отводы объединяются в один или несколько магистральных газоходов, ведущих к центральной фильтрующей установке. Расположение газоходов должно быть удобным для их осмотра и очистки. Уплотнение системы определяется степенью опасности пыли.

Основные фильтры, имеющие значительные размеры и требующие большой площади для обслуживания (для смены фильтров), лучше всего располагать в отдельных помещениях на верхнем этаже. В этом случае фильтр достаточно удален от технологических операций, его можно изолировать при пожаре. Если при смене фильтра возможно распространение опасной пыли, вентиляционную камеру относят к разряду опасных зон (т. е. радиоактивных сооружений). Обслуживающий персонал обязан входить в камеру в защитной одежде.

При проектировании необходимо определить размеры и типы фильтрующих установок для центральной системы очистки, а также количество фильтров, работающих параллельно; более предпочтителен монтаж крупных фильтров. По возможности монтаж фильтров следует проводить таким образом, чтобы пыль осаждалась на верхней стороне фильтрующей среды и не ссыпалась при смене фильтра. При значительной γ-активности проект должен предусматривать соответствующую защиту фильтра и возможность смены при помощи дистанционного управления.

Различные типы фильтров описаны в гл. V, методы монтажа — в гл. IX.

Если предфильтры и местные фильтры расположены отдельно от основных фильтров, то при общей вентиляции их устанавливают внутри вытяжных шахт, при местной вытяжке — внутри вытяжных шкафов, а в газоходе — в непосредственной близости от места отсоса. Расположение предфильтров определяется возможностью

доступа к ним и требованиями минимального распространения пыли при смене предфильтров. В отводах устанавливаются набивные фильтры или фильтры с вкладышами, в газоходах — фильтры в специальных корпусах.

Проект системы очистки должен предусматривать минимальное осаждение горючей пыли внутри фильтров и в газоходах. Первичные пылеуловители должны обеспечивать снижение нагрузок на основные фильтры. Перед поступлением в газоход воздух следует очищать от пыли, насколько это возможно, особенно при наличии опасных пылей (например, металлических). Применяемые для снижения нагрузки предфильтры и другие первичные пылеотделители, в которых может скапливаться горючая пыль, следует приближать к источникам пылевыделения и удалять от конечных фильтров.

Фильтры тонкой очистки должны всегда располагаться на определенном расстоянии от возможных источников огня. При обычной вентиляции помещений, в которых не производят особо опасных веществ, негорючие фильтры устанавливаются в газоходе на расстоянии нескольких метров от вытяжной шахты, если пыль не изменяет своих свойств с повышением температуры при пожаре в помещении. Однако в этом случае необходима установка предфильтров — искроуловителей, которые предотвратят проникновение искр. Если возможно возникновение сильных пожаров, например при отсасывании горючих растворителей или пыли, выделяющейся в процессах шлифовки, горючие и негорючие фильтры, установленные без защиты в вытяжных шкафах, перчаточных боксах и т. п., почти всегда разрушаются под действием огня. Защиту от твердых раскаленных частиц, перемещающихся по газоходу, обеспечивают искроуловителями; в этой роли весьма эффективны стекловолокнистые предфильтры. Если в предфильтре накапливается горючая пыль, которая может воспламениться от искр, за ним устанавливается надежный металлический искроуловитель.

Огнепреградители из-за несовершенства их конструкции недостаточно эффективны, поэтому фильтры в системах следует располагать так, чтобы горячий воздух не достигал фильтрующей среды. Фильтры, включенные последовательно, устанавливаются на таком расстоянии один от другого, чтобы при воспламенении первого по ходу воздуха горячий воздух не достиг бы второго.

Вентиляторы и другое механическое оборудование, которое обычно устанавливается в чистой зоне, можно размещать в соседнем помещении и даже снаружи здания так, чтобы к ним был обеспечен свободный доступ. При обслуживании вентиляторов следует принимать меры предосторожности, так как и в очищенном воздухе может содержаться некоторое количество загрязнений.

Дымовые трубы располагаются вдоль стен или на крыше здания. К ним необходим доступ для осмотров, ремонта и взятия проб.

На рис. 8.18 показано принципиальное размещение элементов фильтрующей системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. D r i n k e r P., H a t c h T. Industrial Dust. 2nd edn. McGraw-Hill, 1954.
2. Air Pollution, vol. 2 (Ed. A. C. Stern). N.Y., Academic Press, 1962.
3. Glove Boxes and Shielded Cells (Ed. Waldron). London, Butterworths, 1960.
4. W h i t e P., S m i t h S. Inert. Atmospheres. London, Butterworth, 1962.
5. F o u n t a i n A. (частное сообщение).
6. B l o o r W. et al. Dust Control and Air Cleaning Symp. of Inst. Mech. Engrs, 1963.
7. H o l m e s W. (частное сообщение).
8. CDEE Porton Technical Note No. 33.
9. P a s q u i l l D. Meteorol. Mag. Lond. Feb., **33** (1961).
10. D e n n i s R. et al. Blast Effects in an Air Cleaning System. W-T-1475, Dept. of Commerce, Washington.

Глава IX

ОБСЛУЖИВАНИЕ ФИЛЬТРУЮЩИХ УСТАНОВОК

В этой главе рассматриваются системы комбинированной обработки воздуха, на некоторых ступенях которых предусматривается установка высокоэффективных фильтров. Однако ни принципы, ни детали общепринятых систем кондиционирования и очистки приточного воздуха не обсуждаются, все внимание сосредоточено на тех аспектах промышленного проектирования, эксплуатации и обслуживания, которые непосредственно относятся к приведению высокоэффективной фильтрации.

С практической точки зрения проектировщик системы фильтрации воздуха должен решить, какой тип оборудования выбрать и как использовать его с учетом распределения воздуха, сопротивлений элементов системы и других условий, чтобы обеспечить наибольшую экономичность.

Требования к эффективности очистки воздуха постоянно повышаются, вследствие чего становится все труднее подобрать фильтр, наиболее подходящий для данной операции. Высокоэффективные фильтры — это самые дорогие аппараты, поэтому при выборе того или иного типа фильтра следует учитывать капитальные и эксплуатационные расходы.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Любая система для высокоэффективной очистки воздуха, вероятно, потребует более высоких требований в отношении конструкции, испытаний и эксплуатации по сравнению с обычной фильтрацией воздуха. Эти требования должны соответствовать функциональным особенностям их использования. Если высокоэффективные фильтры необходимы для удаления нетоксичных частиц из воздушного потока рециркулирующей системы (например, в помещениях по производству фотоматериалов или на фармацевтических фабриках), то требования к установке будут незначительно отличаться от общеприня-

тых. Если же фильтрация связана с улавливанием патогенных бактерий или радиоактивных веществ высокой активности, соответствующие требования должны быть очень высокими.

При проектировании этих установок особое внимание необходимо уделить следующим вопросам.

1. Контрольно-измерительная аппаратура. Обслуживающий персонал, ответственный за повседневный контроль очистных установок и имеющий дело с опасными веществами, должен располагать простыми и надежными средствами для ведения контроля.

2. Общая схема установки. Фильтры вытяжной системы должны иметь эффективность более 99,95%. Они пригодны только для очистки воздуха с небольшой запыленностью. Схема расположения фильтров и всей системы определяется этими факторами. Монтаж высокоэффективных систем должен производиться самым тщательным образом. Систему, состоящую из отдельных коробчатых фильтров, следует предпочесть обычной ячейковой компоновке. Возможность применения предфильтров и решения проблемы уменьшения пожарной опасности даже так называемых невоспламеняющихся фильтров (с помощью искроуловителей, огнезаградителей и заградительных противопожарных перегородок) имеет серьезное значение при окончательном выборе системы и ее размещении.

3. Инструктаж. Для того чтобы система высокоэффективной очистки удовлетворительно работала в течение всего срока службы, персонал, ответственный за проектирование, монтаж, испытания и эксплуатацию, должен действовать согласованно на всех этих этапах. Например, прежде чем определить расположение высокоэффективных фильтров в системе, следует предусмотреть способ их замены.

За последние годы накоплен большой опыт работы. Внесено много усовершенствований в действующие и проектирующиеся установки, ведущих к снижению их стоимости.

ПОДАЧА ВОЗДУХА

Количество воздуха, подаваемого в рабочие помещения, не должно быть меньше того количества, которое удаляется вытяжной системой. Для подачи воздуха в большинстве случаев применяются вентиляторы, в то время как в обычных системах вытяжные установки хорошо обеспечивают вентиляцию в целом, втягивая достаточное количество свежего воздуха через окна, двери или специальные впускные отверстия. Однако, когда необходима очистка воздуха, в особенности высокоэффективная, установка только вытяжного вентилятора недопустима. В этих случаях приточный вентилятор подает свежий воздух через входное отверстие, расположенное на наружной стене здания, и далее через предварительный подогреватель, сетки для улавливания летучего мусора, нагревательные батареи и т. д. Эти агрегаты рациональнее размещать до вентилятора, так как они занимают относительно большую площадь.

Кроме того, фильтры необходимой эффективности можно установить на всасывающей или нагнетательной стороне вентилятора или с обеих сторон в зависимости от общей требуемой степени очистки поступающего воздуха и расположения установки. Окончательный выбор схемы предоставляется проектировщику. Вентилятор подает очищенный и нагретый воздух непосредственно в систему воздуховодов или в камеру приточной вентиляции, откуда по отдельным воздуховодам он направляется в различные рабочие помещения.

Система воздуховодов приточной вентиляции общепринятая; воздуховоды обычно изготовляют из оцинкованного листа со скользящими или фланцевыми соединениями в зависимости от толщины листа, размера и формы воздуховодов.

Для специфических производств необходимо дополнительно иметь следующее.

1. При использовании оборудования, связанного с радиоактивной или токсической опасностью, воздуховоды по возможности должны проходить по чистым помещениям, т. е. там, где нет радиоактивности и токсичности. Это следует учитывать при планировке помещений. Конкретное исполнение определяется капитальными затратами и характером установки.

2. Расположение приточных решеток в рабочих помещениях должно быть таким, чтобы не образовывались застойные зоны. При наличии аэрозолей идеальным решением является установка приточных решеток на более высоком уровне, чем вытяжных, хотя это не всегда удается.

3. В тех случаях, когда воздуховоды проходят из «чистой» зоны в «грязную» (или наоборот), отверстия в стене или перегородке должны быть уплотнены, чтобы предотвратить перетекание воздуха из одной зоны в другую.

Таким образом, приточной вентиляцией в рабочие помещения подается только очищенный воздух, который затем удаляется вытяжной системой. В помещениях обычно поддерживается небольшое разрежение, что необходимо учитывать при проектировании здания. Инфильтрация воздуха должна быть сведена к минимуму закрытые окна и шлюзование входов с подачей воздуха).

МЕСТНЫЕ ВЫТЯЖНЫЕ УСТРОЙСТВА

Местная вытяжная вентиляция наиболее часто используется для предотвращения проникновения пыли в окружающие рабочие помещения. Невозможно переоценить значение эффективных ограждений вокруг действующих установок. Нередко они неверно проектируются и устанавливаются, что приводит к усложнению и удорожанию эксплуатации. Все элементы системы вытяжной вентиляции должны быть правильно сконструированы, качественно выполнены и тщательно испытаны до сдачи в эксплуатацию. Далее необходимо регулярно проверять их, не допуская снижения эффективности. Часто вытяжные системы проектируются с большим запасом

по производительности (в расчете на колебания), но это неверно. Следует обращать внимание на состояние уплотнений, прокладок, крепежных деталей и т. д. Эксплуатация установки должна проводиться на таком же техническом уровне, как и эксплуатация основного оборудования.

Применение высокоскоростных отсосов для локализованных источников пылеобразования рассмотрено в гл. VIII, применение первичных пылеуловителей — в гл. VII. В эксплуатации большое значение имеют высокая герметичность и надежность этих устройств. В рабочих помещениях может происходить множество процессов, требующих различных местных устройств, таких, как перчаточные боксы, вытяжные шкафы, воздушные завесы и вытяжные зонты (см. гл. VIII). Разнообразие рабочих условий и широкий диапазон требований говорят о необходимости внимательного и вдумчивого отношения к проектированию и установке вытяжных систем.

ГЛАВНАЯ ВЫТЯЖНАЯ СИСТЕМА

Назначение главной вытяжной системы — собрать воздух из различных лабораторий, вытяжных шкафов, перчаточных боксов и производственных помещений, пропустить через фильтры и выбросить в атмосферу через дымовую трубу.

Естественно, что в связи с этим возникает ряд практических проблем. Различные установки отличаются друг от друга назначением, расположением элементов и конструкцией. Однако существуют и общие требования к установкам.

Рассмотрим некоторые из них.

1. Расположение вытяжных решеток в лабораториях и производственных помещениях должно предотвращать образование застойных зон.

2. Материал, выбранный в соответствии с размером и формой воздуховода, должен быть такой, чтобы уровень шума в помещениях для персонала не превышал допустимых норм. Допускаемый уровень шума для лабораторий обычно очень низок, поэтому часто приходится предусматривать специальные меры для снижения шума: жесткое крепление воздуховодов и гибкое соединение с вентиляторами и другими источниками шума, вытяжные решетки с соответствующими жалюзи.

3. Все соединения между секциями воздуховода необходимо соединять болтами. Сопрягаемые поверхности должны быть плоскими для удобства применения уплотнений из резины или пластического материала. Допустимо использование комбинированных соединений для получения герметичности, но не рекомендуются скользящие соединения, так как при некоторых условиях через них происходит утечка аэрозолей наружу.

4. Следует помнить, что очень часто в здании одновременно выполняются металлургические и химические процессы, и обычная вытяжная система должна удовлетворительно работать в этих услови-

ях. Необходимо бороться с дымами у источников их образования, так как они оказывают вредное влияние на материалы конструкций. Хотя очень часто запыленный воздух разбавляется чистым, этой проблеме необходимо уделять большое внимание до того, как будут выбраны материалы воздуховодов и соединений.

5. Внутри системы воздуховодов не должно быть выступов, способствующих осаждению пыли. Не всегда имеется возможность сохранить чистой внутреннюю поверхность воздуховодов, поэтому необходимо устраивать специальные окна для их проверки и чистки.

6. Замена отдельных секций воздуховода, бывших в эксплуатации, является сравнительно дорогостоящей операцией. Поэтому изготовление и отделка воздуховодов требуют особой тщательности и технические условия на их изготовление должны предусматривать дробеструйную очистку для удаления следов ржавчины, жира и др. с последующим напылением цинка номинальной толщины и предварительной обработкой внутренней поверхности хроматом цинка; в ряде случаев требуется покрытие из хлорированного каучука.

7. В дополнение к конструктивным требованиям вся система воздуховодов должна выдерживать давление воздуха в зависимости от сопротивления системы, обычно ± 300 *мм. вод. ст.*

Методы определения размеров воздуховодов и их сопротивлений те же, что и для стандартных систем отопления и вентиляции, причем величины давления обычно даются в миллиметрах водяного столба. Данные о скоростях в воздуховодах приведены в гл. VIII.

ВЫТЯЖНЫЕ ТРУБЫ

Вытяжные трубы — это самые простые устройства для удаления загрязненного воздуха. Высота трубы имеет большое значение. Если она слишком мала, выбросы могут загрязнить окружающую местность. При высокоэффективной очистке высота трубы достигает 75 *м*.

Невозможно полностью описать конструкции всех типов вытяжных труб, но некоторые общие детали будут полезны. Для удаления воздуха, который очищается в рассматриваемых установках, обычно применяются вытяжные трубы из листовой стали. Они гораздо дешевле других типов (например, из кирпича или бетона), так как монтаж требует мало времени, а фундамент дешевле. Правда, необходимы средства на окраску труб с целью предупреждения коррозии. Однако эти расходы незначительны при правильном проектировании вытяжной системы.

На выбор конструкции трубы влияет ее месторасположение. Как известно, от действия воздуха, содержащего соли и воду, трубы из нержавеющей стали разрушаются.

Возможны повреждения труб вследствие вибраций от сильных ветров, особенно в случае несущей конструкции. Избежать этого помогают канатные растяжки.

Для осмотра и текущего ремонта обычно устанавливается наружная лестница с предохранительной клеткой, а иногда устройства для спасательной веревки и блоки.

При проектировании следует также предусматривать защиту труб от ударов молнии. Во время эксплуатации обязательны регулярные проверки целостности громоотвода и его сопротивления.

ШУМ

В последнее время проблеме борьбы с шумом уделяется серьезное внимание вследствие использования большого количества механических устройств, являющихся источниками шума. Благоприятная реакция обслуживающего персонала на окружающие условия обеспечивается тщательным акустическим проектированием зданий и оборудования (табл. 9.1).

Таблица 9.1

Характерные уровни шумов для различных помещений, *дб*

Помещения	Минимальный	Средний	Максимальный
Служебные	50	60	70
Лаборатории	25	40	55
Склады	50	60	70
Производственные	55	70	80

Некоторые звуки более нежелательны, чем другие; одни можно устранить, интенсивность других — снизить.

Проектирование систем вентиляции должно проводиться в соответствии с архитектурными и акустическими требованиями. К сожалению, этой серьезной проблеме не уделяют должного внимания, что приводит к возникновению постоянного шума, мешающего работе, и к дополнительным расходам из-за многочисленных переделок как до сдачи системы в эксплуатацию, так и во время эксплуатации. Обычно шум в воздушном потоке вызывается слишком высокими скоростями воздуха и частично — избыточной турбулентностью.

Практически скорости воздуха в зависимости от диаметра и длины воздуховодов, количества колен и других показателей лежат в пределах 3,5—7,6 *м/сек*.

Шум от воздушных решеток обычно невелик. Существуют два типа решеток с различными акустическими характеристиками: решетки, которые создают незначительное сопротивление потоку воздуха и обеспечивают его вход или выход в виде относительно равномерных сплошных струй, и решетки, которые создают резкое

сжатие или расширение струи и короткие толчки, сопровождаемые турбулентностью.

Известны два метода снижения уровня шума. Один из них состоит в использовании большего числа выпускных отверстий меньшего размера, что обеспечивает более равномерное распределение воздуха (за счет уменьшения степени расширения струи воздуха, приходящегося на одно отверстие). Другой предполагает снижение скорости воздуха, что на практике приводит к увеличению количества отверстий для получения эквивалентного распределения воздуха. Таким образом, в любом случае необходимо большее число отверстий.

Воздуховоды часто являются средством передачи шума из помещения, где расположена установка, в рабочие помещения. Для нейтрализации шума используют более массивные материалы, иногда даже отформованные, например, из асбеста. Кроме того, применяются специальные звукоизоляционные материалы. Для поглощения звука, передаваемого вдоль воздуховода, можно использовать некоторые виды облицовки.

Установлено, что если пренебречь отражением звука от концов и колен, то затухание шума, передаваемого вдоль воздуховода (в децибеллах), прямо пропорционально его длине и периметру, обратно пропорционально площади поперечного сечения и прямо пропорционально (или приблизительно прямо пропорционально) коэффициенту поглощения звука материалом внутренней поверхности.

Умеренное затухание шума происходит непосредственно в воздуховоде, так что длинные воздуховоды, особенно с коленами, редко нуждаются в специальной изоляции. Короткие прямые воздуховоды, особенно большого диаметра, следует подвергать специальной подготовке, если интенсивность звука велика, а уровень шума в рабочем помещении необходимо снизить.

Длина воздуховода в соответствии с допускаемым уровнем шума может оказаться практически неприемлемой. Есть два выхода из этого положения.

1. Разбить воздуховод на такие участки, чтобы на единицу длины приходилось возможно больше материала.

2. Увеличить диаметр воздуховода и установить в нем глушители звука, устроенные так, что отраженные волны могут пройти только через них, все отражающие поверхности покрыть материалом, поглощающим звук. Все это, конечно, увеличит сопротивление.

Короткие участки воздуховода в лучшем случае требуют некоторого демпфирования. Каждый конец более длинного воздуховода обычно обрабатывают соответствующим образом на расстоянии 3—6 *м* в зависимости от размера воздуховода и допускаемого уровня шума. Это проводят как в вытяжных, так и в приточных воздуховодах, так как умеренные скорости воздуха не влияют существенно на передачу шума.

Сопротивление системы

Сопротивление вентиляционной системы определяет рабочий режим вентиляторов, поэтому для правильного и экономичного их использования необходимо понимать причины, вызывающие потери давления в системе. Нужно знать производительность, которая обычно известна заранее (при проектировании схемы очистки), и давле-

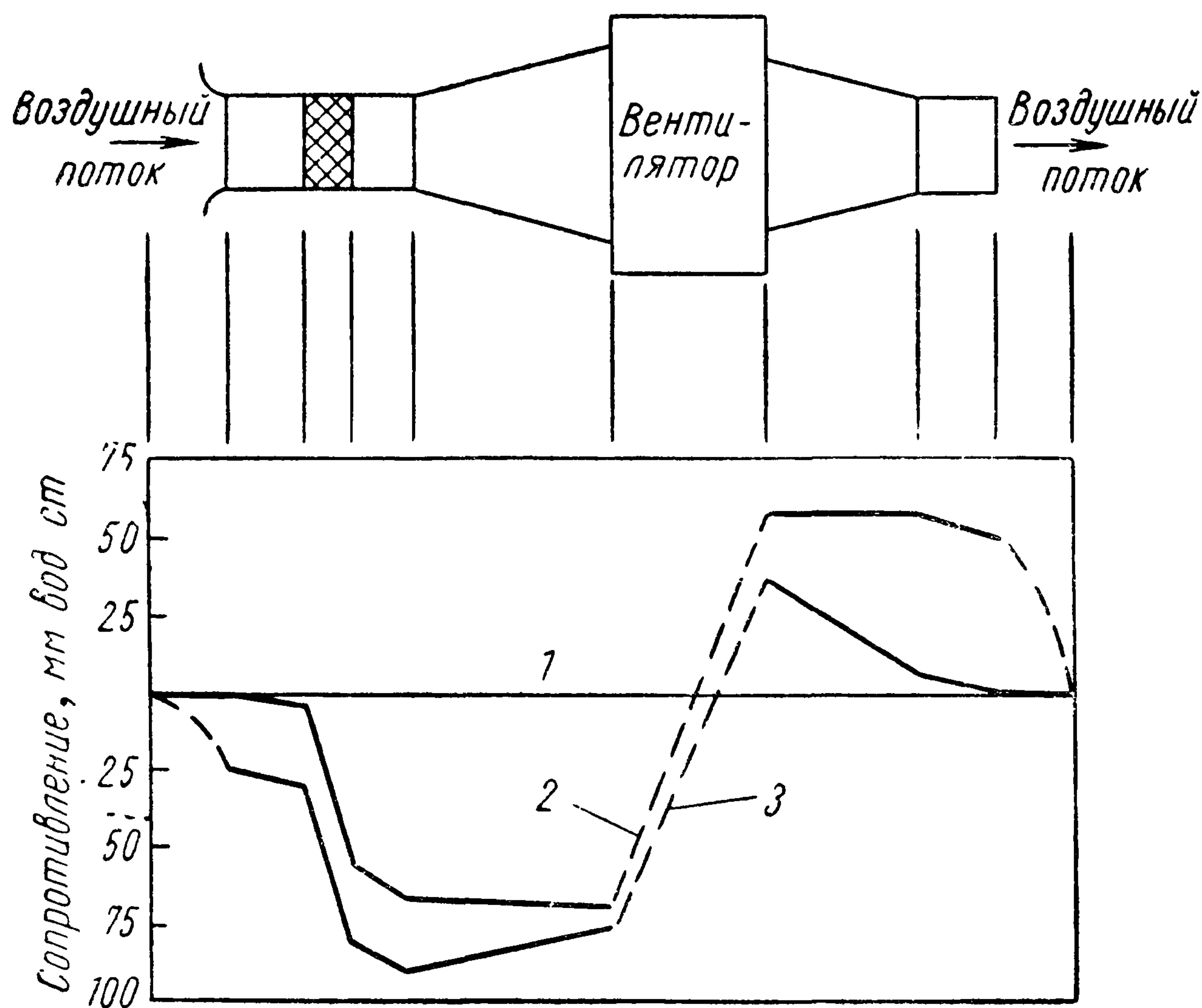


Рис. 9.1. Типичная кривая изменений сопротивлений в системе по участкам:

1 — атмосферное давление; *2* — общее давление; *3* — статическое давление.

ние, при котором должен работать вентилятор. Последнее окончательно определяется только после монтажа всей системы.

Полное давление, развиваемое вентилятором для преодоления сопротивления системы воздуховодов и установки, равно общим потерям на трение и изменение скорости в воздуховодах. Другими словами, это работа, затраченная на ускорение воздуха и преодоление трения. Полная потеря давления всей системы равна сумме потерь в составных частях. Следует иметь в виду, когда воздух выбрасывается в атмосферу, потеря давления, эквивалентная скоростному напору на выходе, должна быть добавлена к потерям составных частей системы; сумма потерь окажется равной полному сопротивлению (или потере давления) системы. Затем по рабочим характеристикам или таблицам, в которых указано полное давление, подбирается вентилятор.

Выбор вентилятора обычно определяется статическим давлением (разрежением), которое он развивает; статический напор равен разности полного давления и скоростного напора на выходе.

Характерная кривая изменений давления с данными потерь по тракту приведена на рис. 9.1. Это наглядный способ изображения явлений в системе, который показывает величины статического и полного давлений в соответствующих точках. Исходными точками графика изменения давления служат точки, в которых давление известно (обычно свободная атмосфера). Вычерчивается общая кривая давления с учетом закона Бернулли и строится кривая статического напора.

Зная количество воздуха и давление, можно выбрать подходящие вентиляторы, которые обычно проектируются для оптимальной производительности при данном режиме работы, но вентиляторы могут работать и при других условиях, которые определяются по таблице или графику зависимости напора от производительности.

При использовании первичных фильтров и других вспомогательных аппаратов для грубой очистки, например в вытяжных кабинах и шкафах, для преодоления добавочного сопротивления устанавливается дополнительный местный вентилятор, позволяющий уравнивать давление в главной системе.

Типы вентиляторов

Различают два основных типа вентиляторов: осевые и центробежные. Последние подразделяются на три класса в зависимости от конструкции лопаток: с лопатками, загнутыми вперед (по вращению); с радиальными лопатками; с лопатками, загнутыми назад.

Характеристики вентиляторов

Работа различных типов вентиляторов подчиняется следующим трем законам:

1) расход воздуха пропорционален числу оборотов колеса;

2) развиваемый напор пропорционален квадрату числа оборотов;

3) потребляемая мощность пропорциональна кубу числа оборотов.

Кроме того, плотность воздуха изменяется обратно пропорционально абсолютной температуре и прямо пропорционально барометрическому давлению. Таким образом, для одного и того же объема сопротивление и мощность пропорциональны плотности воздуха.

Типичные характеристики центробежного и осевого вентиляторов показаны на рис. 9.2. и в табл. 9.2.

Таблица 9.2

Относительные характеристики различных вентиляторов

Параметр	Центробежные вентиляторы			Осевые вентиляторы
	с лопатками, загнутыми назад	с радиальными лопатками	с лопатками, загнутыми вперед	
Первоначальные затраты	Высокие	Средние	Низкие	Высокие
К. п. д.	Высокий	Средний	Низкий	Высокий
Стабильность работы	Хорошая	Хорошая	Плохая	Хорошая
Занимаемая площадь	Средняя	Средняя	Малая	Малая
Скорость рабочего колеса	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая

В книге детально не обсуждаются преимущества различных типов и классов вентиляторов. Следует подчеркнуть, что встречаются системы с переменным сопротивлением, и выбранные вентиляторы должны обеспечить их нормальную работу.

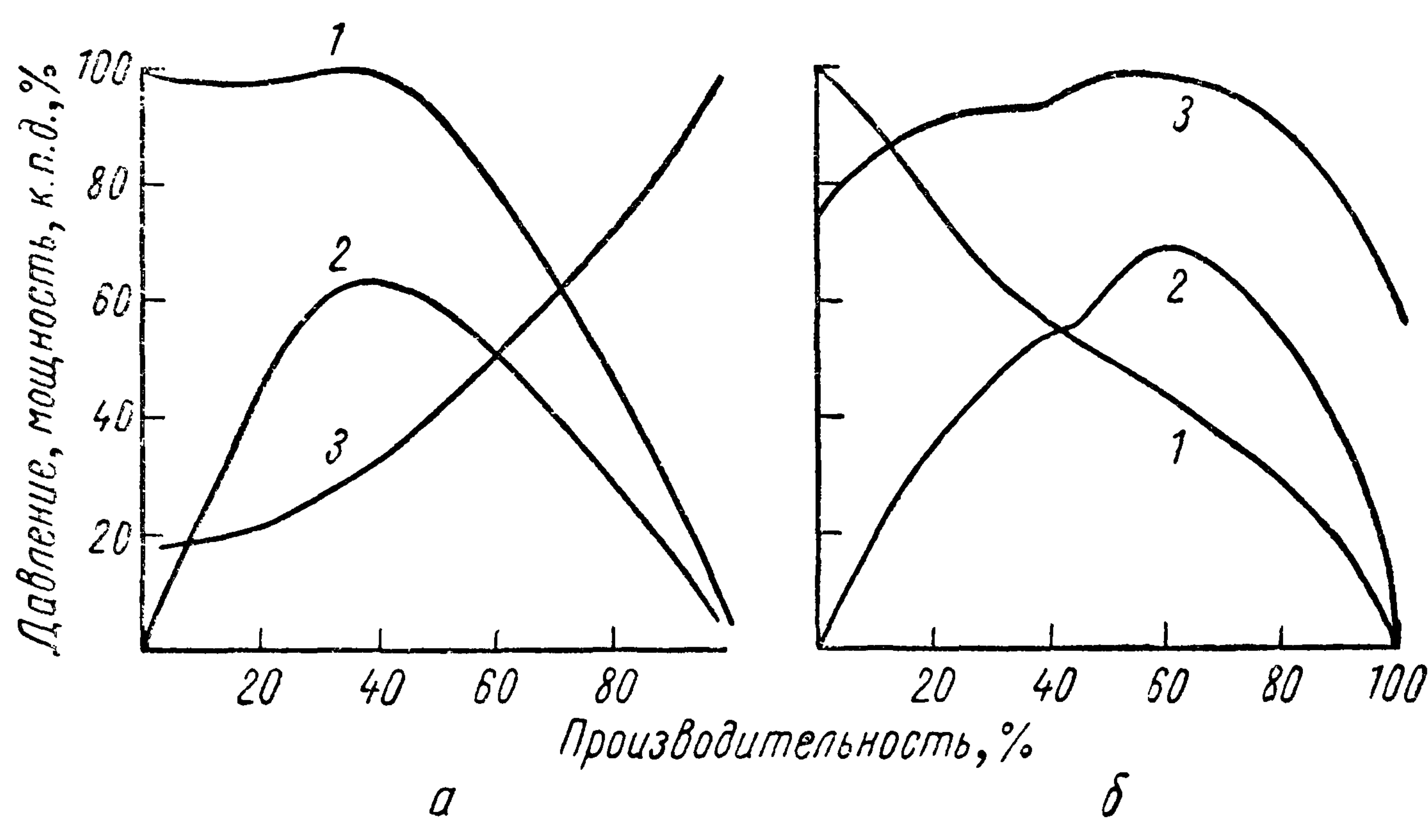


Рис. 9.2. Типичные характеристики центробежного (*а*) и осевого (*б*) вентиляторов:

1 — давление; *2* — к. п. д.; *3* — мощность.

Необходимый расход воздуха или газа должен поддерживаться в определенных пределах. По мере забивания фильтров вытяжной системы ее производительность уменьшается до величины, определяемой точкой пересечения характеристик вентилятора и системы (рис. 9.3).

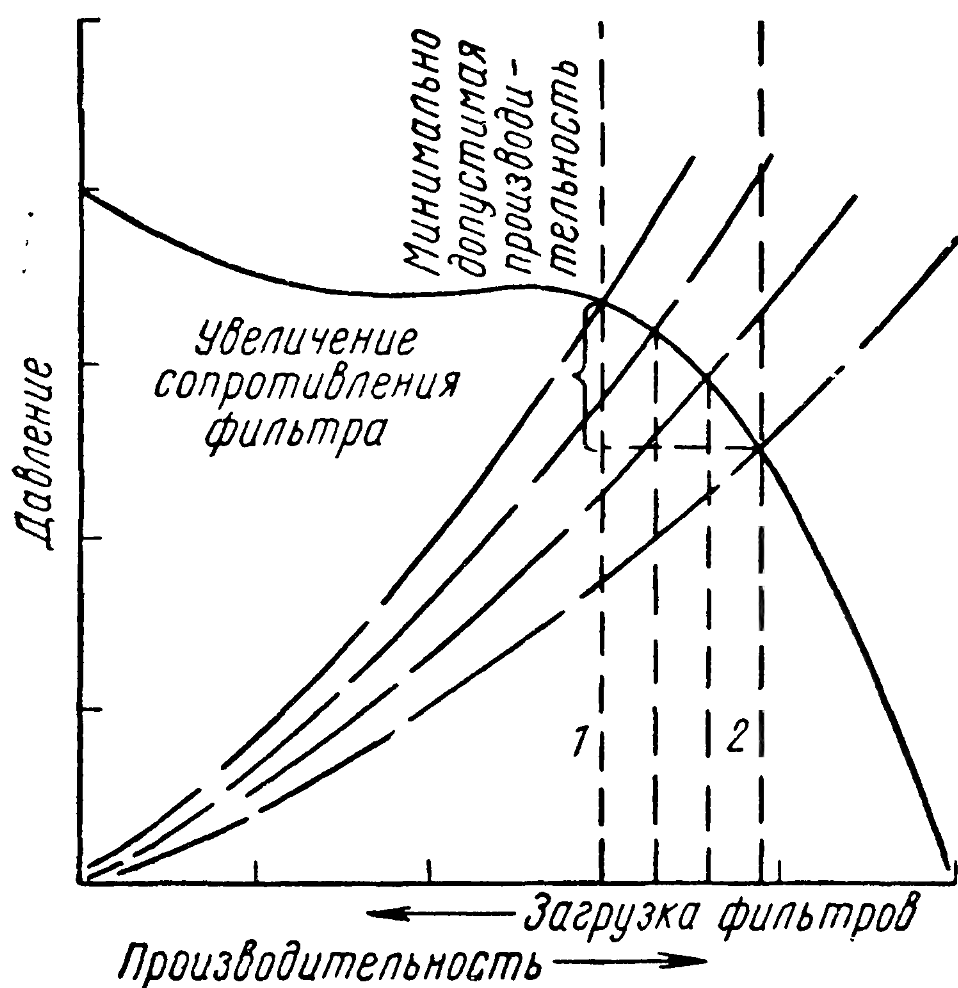


Рис. 9.3. Влияние роста сопротивления фильтров на производительность системы: 1 — забитый пылью фильтр; 2 — чистый фильтр.

Регулирование производительности вентиляторов

Регулирование системы, необходимое для преодоления возрастающего сопротивления фильтров при неизменном расходе, осуществляется несколькими способами.

1. Демпферное регулирование. Этот способ дает наилучшие результаты для центробежных вентиляторов и не рекомендуется для осевых. Регулирование производительности происходит по кривой давление — расход для данного вентилятора (рис. 9.4).

2. Регулирование скорости вращения рабочего класса. Это идеальный способ, так как расход прямо пропорционален скорости вращения колеса вентилятора, давление пропорционально квадрату скорости, а мощность — кубу скорости. Однако регулирование скорости обходится довольно дорого, так как необходимо использовать специальные устройства (ступенчатые шкивы, коробки скоростей) или применять электрическое регулирование.

3. Ступенчатое регулирование. Этот метод достаточно экономичен. Применяются осевые вентиляторы противоположного вращения (с отдельным приводом каждого рабочего колеса). Ступенчатое регулирование осуществляется включением дополнительных вентиляторов или изменением сочетаний вентиляторов. С помощью демпферов можно более тонко отрегулировать расход (рис. 9.5).

ПРИТОЧНЫЕ И ВЫТЯЖНЫЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Система приточной вентиляции должна обеспечивать удовлетворительные условия работы в цехах, лабораториях и различных вспомогательных помещениях, в которых обрабатываются радиоактивные и токсичные материалы.

В одной из типичных систем воздух подается центробежным вентилятором с лопатками, загнутыми вперед (производительностью 160 000 $м^3/ч$), рабочее колесо делает 294 *об/мин*. Вентилятор преодолевает общий статический напор 90 *мм вод. ст.* при скорости воздуха в воздуховодах и оборудовании от 1,8 до 5,0 *м/сек*. При расчете принято во внимание возрастание сопротивления фильтров

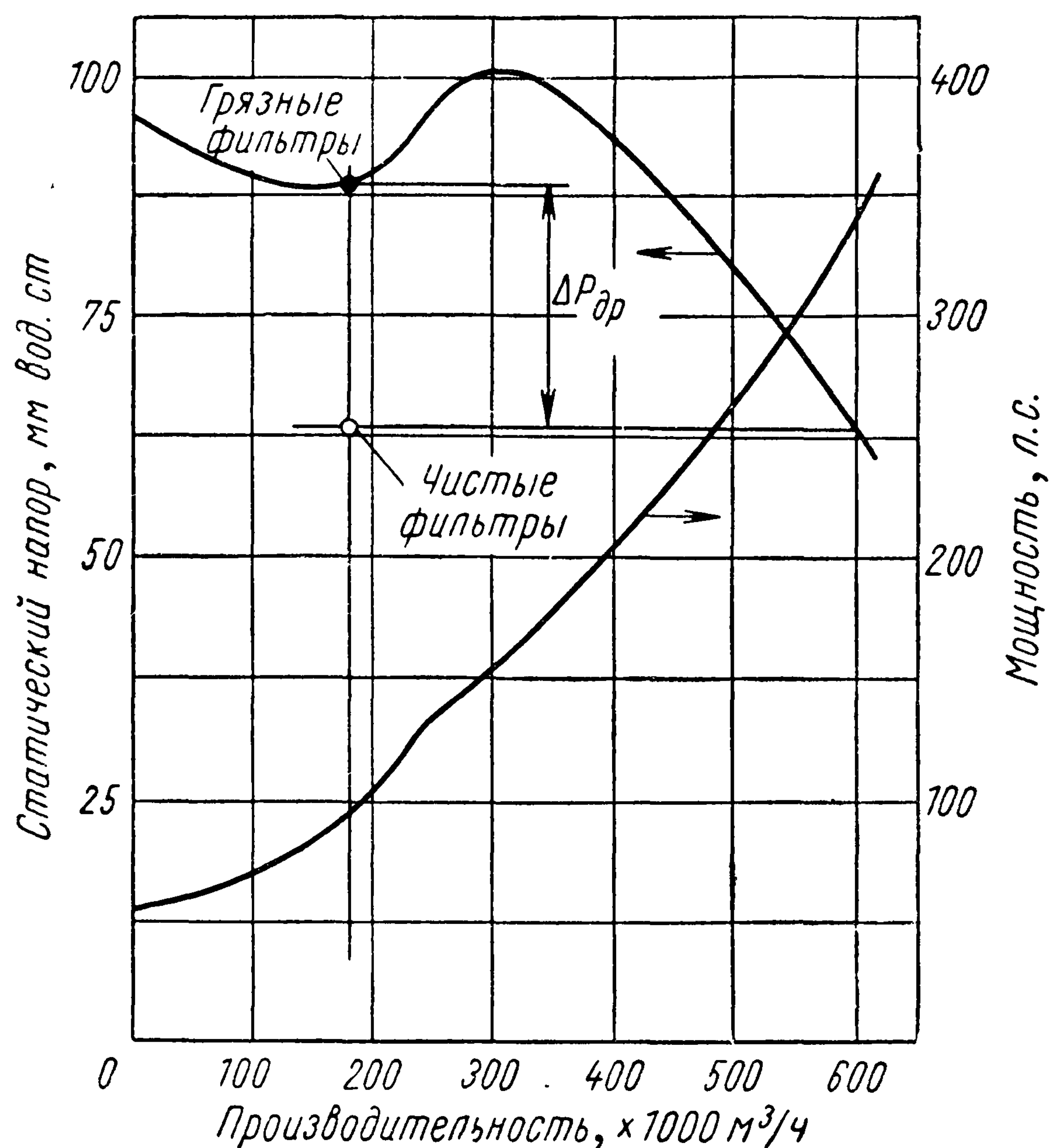


Рис. 9.4. График регулирования работы вентилятора дросселем ($\Delta P_{др}$ — потеря давления на дросселе).

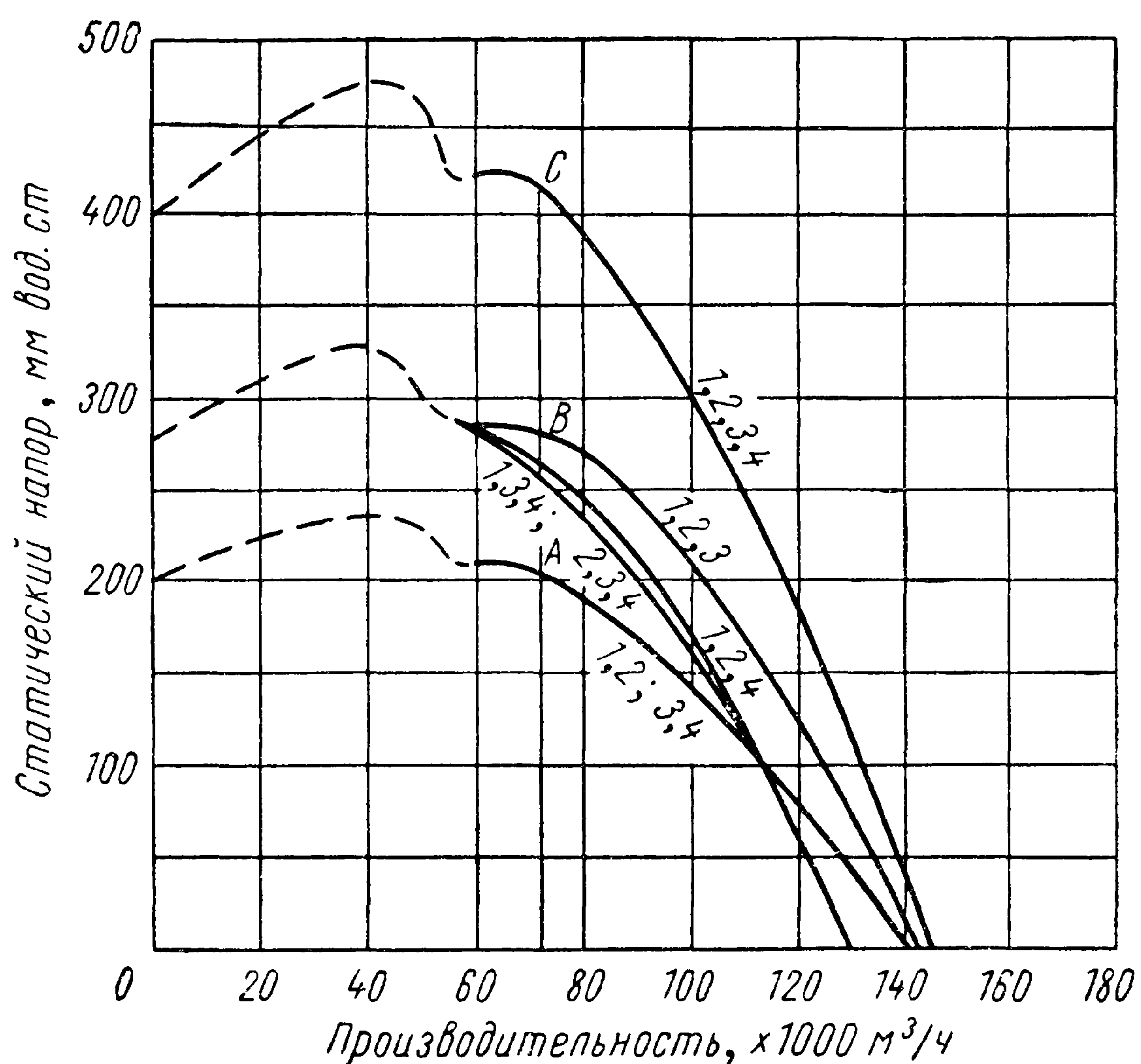


Рис. 9.5. Ступенчатое регулирование осевых вентиляторов.

системы на 50 *мм вод. ст.* Характеристика вентилятора и рабочий режим при сопротивлении 90 *мм вод. ст.* показаны на рис. 9.4. При увеличении сопротивления фильтра с 8 до 33 *мм вод. ст.* постоянная производительность системы обеспечивается многопластинчатым демпфером.

Некоторые вытяжные системы удаляют в атмосферу воздух, очищенный в высокоэффективных фильтрах, и нефильтрованный воздух. Так, в одной системе очистка 73 000 $м^3/ч$ производится фильтрами коробчатого типа (начальное сопротивление 70 *мм вод. ст*).

Сопротивление фильтра этого типа при производительности 1700 $м^3/ч$ возрастает с 70 до 100—125 *мм вод. ст.* при полном заби-

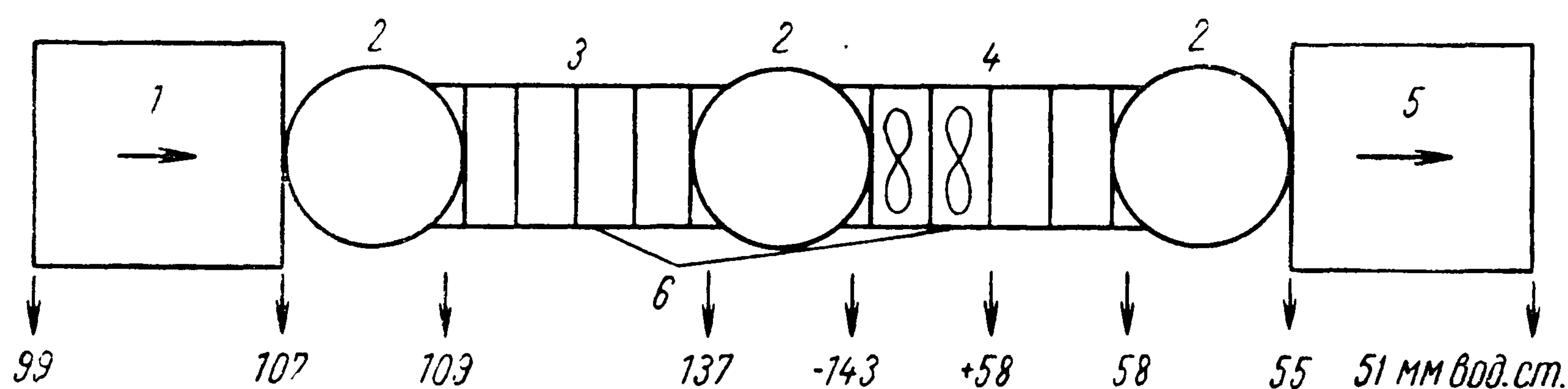


Рис. 9.6. Характерные величины сопротивлений вытяжной системы: *1* — глушитель шума (от фильтров); *2* — ротационный дроссель-клапан; *3* — секция № 1; *4* — секция № 2; *5* — глушитель (шума к выхлопной трубе); *6* — вентиляторы.

вании (см. гл. VIII). Для таких значений начального и конечного сопротивлений (при скоростях воздуха в воздуховодах 1,8—5,0 *м/сек*) были выбраны осевые вентиляторы, соединенные последовательно.

Характеристики вентиляторов с рабочими точками *А*, *В* и *С* для двух, трех и четырех вентиляторов соответственно показаны на рис. 9.5. Характерные значения сопротивления системы видны из рис. 9.6.

В приточной системе для создания начальной производительности применяются многопластинчатые демпферы, которые открываются по мере увеличения сопротивления установки с 200 до 300 *мм вод. ст.* Ступенчатое регулирование производительности обеспечивается включением дополнительного вентилятора и тонким регулированием при помощи демпфера. Такое сочетание регулирования систем приточной и вытяжной вентиляции оказалось наиболее удачным.

После рассмотрения наиболее важных аспектов системы в целом становится очевидным, что уравновешивание системы, состоящей из сотен метров воздуховодов различной формы и размеров, представляет серьезную практическую задачу. Несмотря на стремление конструктора подобрать воздуховоды с равномерными скоростями потока, при переменном расходе через воздуховоды следует устанавливать демпферы и ответвления, чтобы получить хорошо уравновешенную систему.

РАСПОЛОЖЕНИЕ ФИЛЬТРОВ, ВЕНТИЛЯТОРОВ И ДЕМПФЕРОВ

Рабочие и технологические помещения, мастерские обычно размещаются на первом этаже, поэтому вытяжную фильтровальную установку удобно располагать на втором этаже; иногда она примыкает к рабочим помещениям первого этажа. Если определено общее рас-

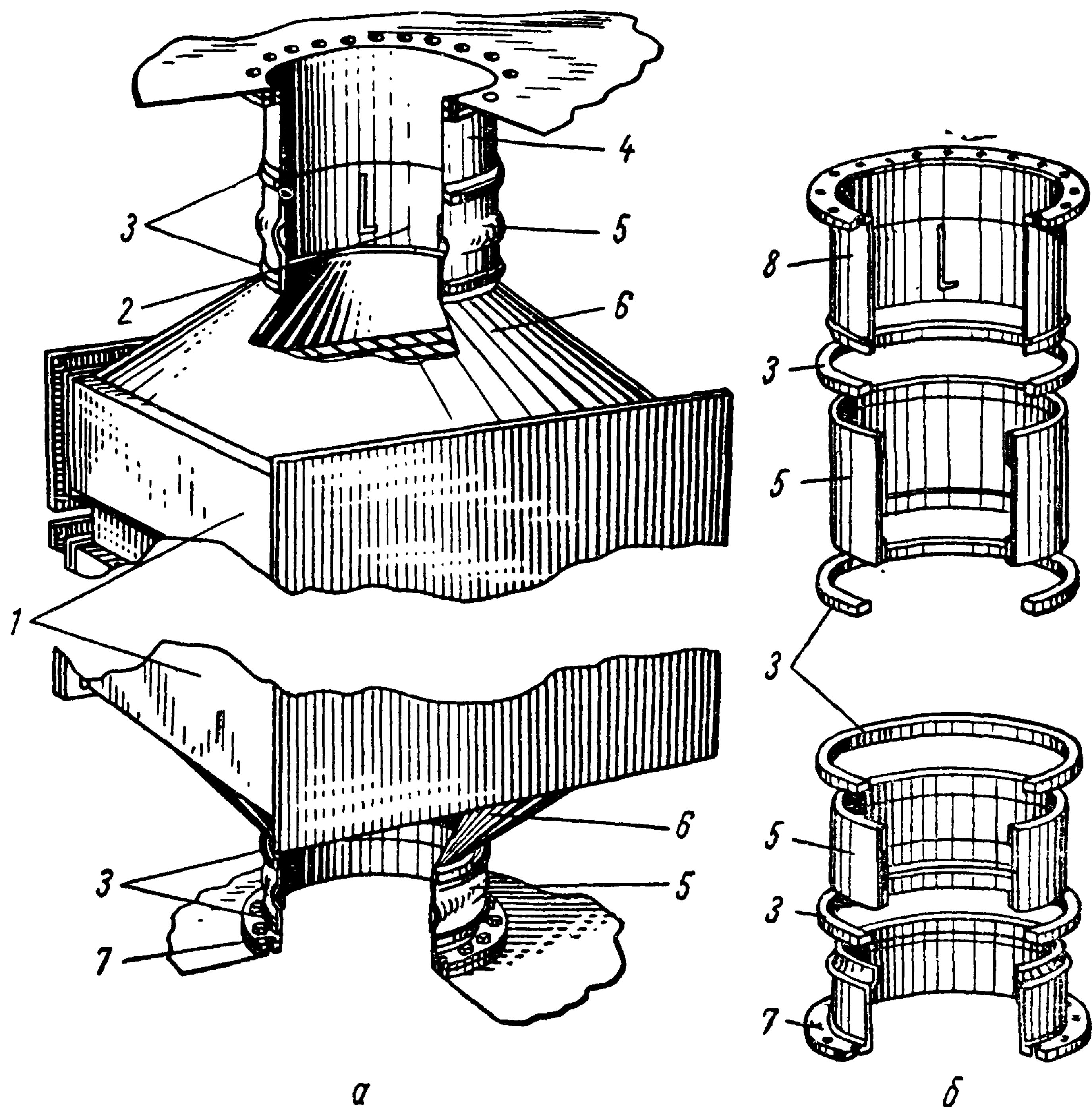


Рис. 9.7. Размещение коробчатого фильтра между воздухораспределительными коллекторами вытяжной системы (*а*) и верхний и нижний соединительные узлы (*б*):

1 — фильтры; *2* — переходный патрубок; *3* — уплотняющие резиновые кольца; *4* — верхняя телескопическая втулка; *5* — резиновый манжет; *6* — корпус фильтра; *7* — нижняя телескопическая втулка; *8* — верхнее телескопическое соединение с переходным патрубком.

положение производственных участков и вытяжной системы, то установить основные магистрали воздуховодов относительно просто. Коробчатые фильтры размещаются между входным и выходным коллекторами, к которым есть доступ для текущего ремонта и замены. Порядок подсоединения каждого фильтра показан на рис. 9.7.

В некоторых случаях фильтры располагаются на каркасе, образуя поперечное сечение вытяжного воздуховода большого размера, или устанавливаются у стены производственного помещения (рис. 9.8.).

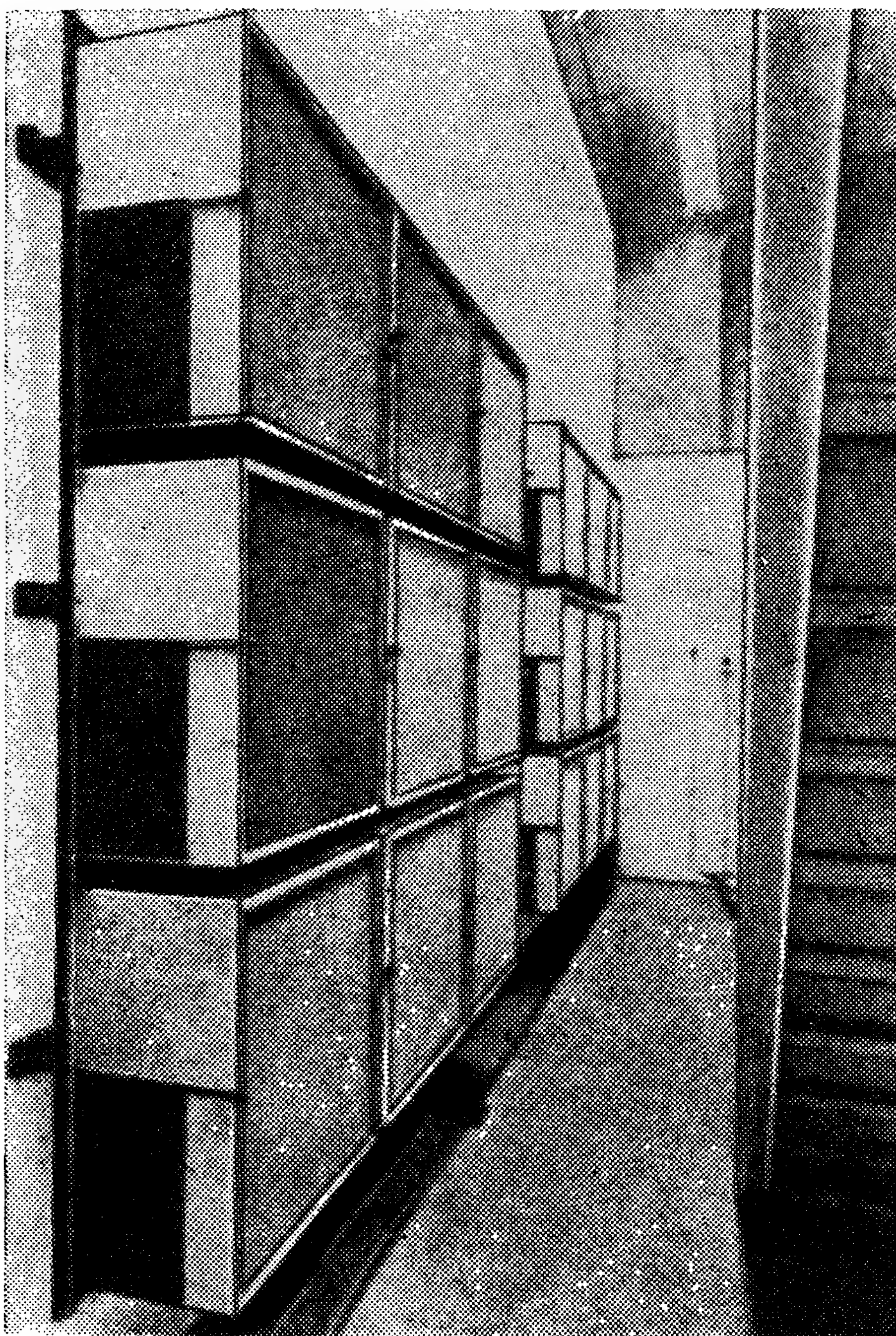


Рис. 9.8. Многосекционный фильтр.

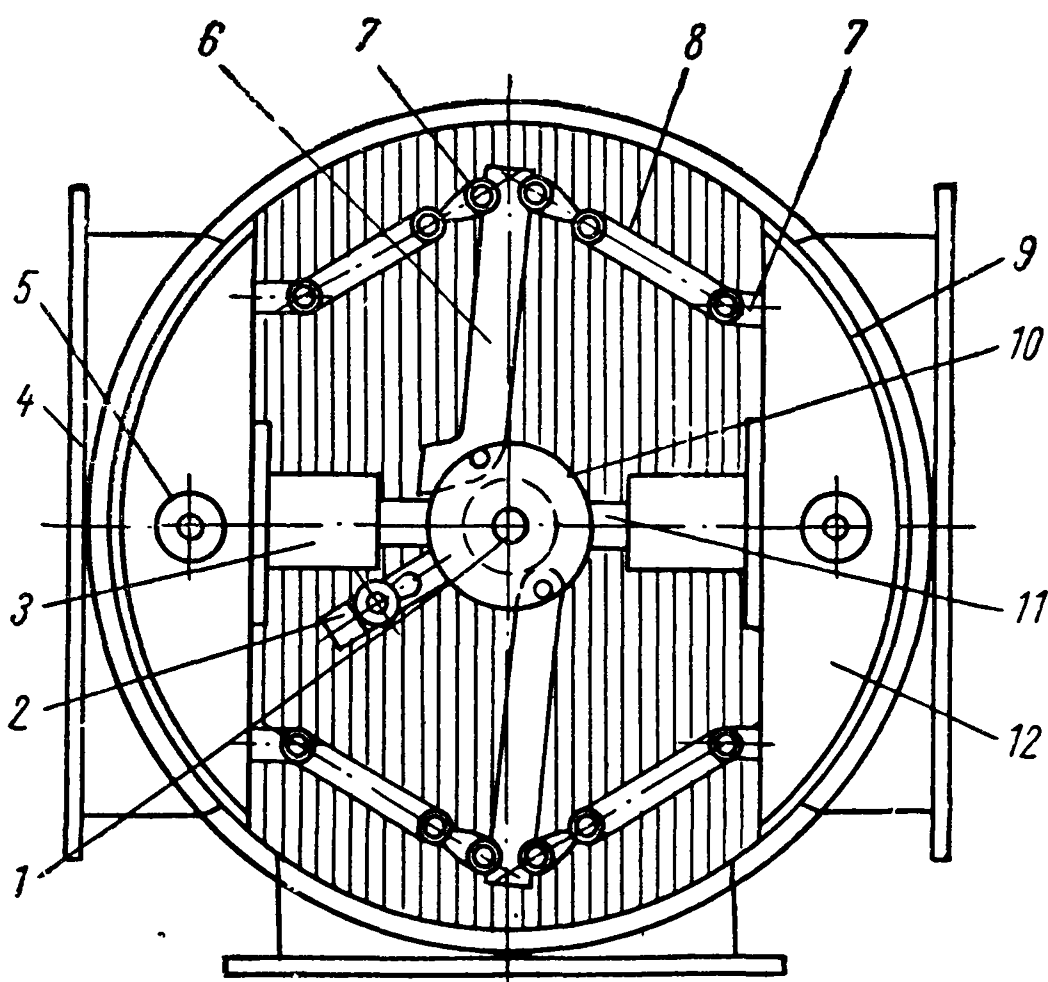


Рис. 9.9. Схема ротационного цилиндрического дроссель-клапана:

1 — главная ось; *2* — чека; *3* — втулка направляющего стержня; *4* — фланец; *5* — ось; *6* — рычаг; *7* — вилка; *8* — установочный рычаг; *9* — резиновая прокладка для уплотнения колодки; *10* — диск привода; *11* — направляющий стержень; *12* — колодка.

При эксплуатации коробчатых фильтров желательно иметь несколько запасных фильтров. Это дает возможность постепенно заменять забитые пылью фильтры.

Коробчатые фильтры имеют много преимуществ; правда, первоначальные затраты на них довольно значительны.

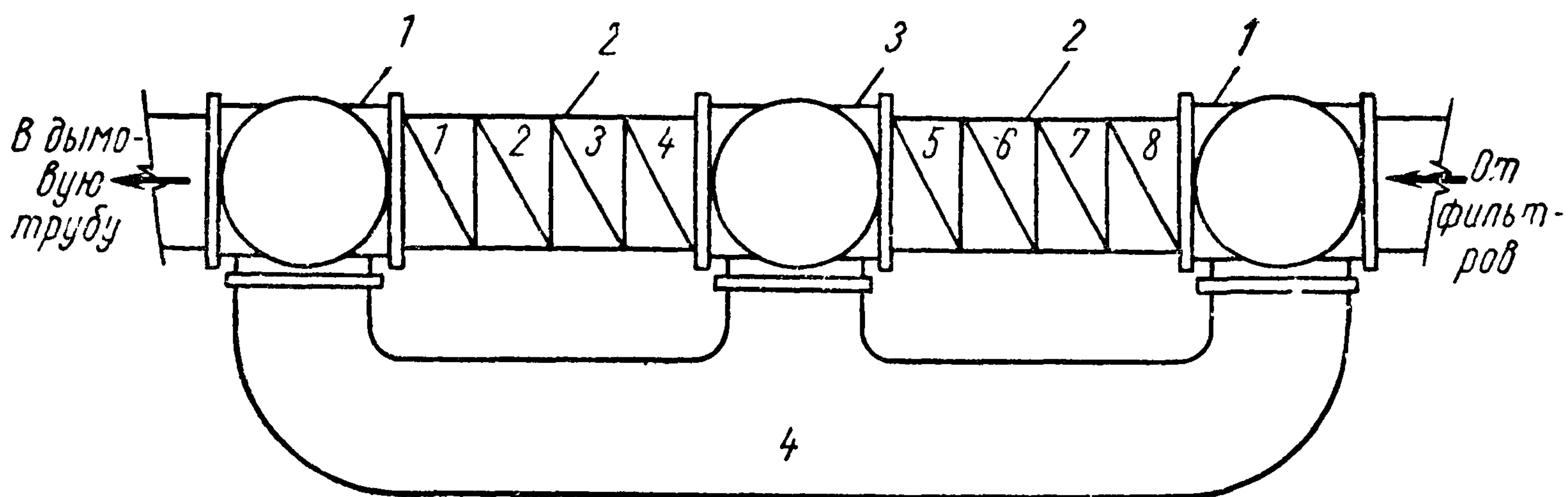


Рис. 9.10. Схема последовательного включения осевых вентиляторов:
1 — двухходовой дроссель-клапан; 2 — четыре осевых вентилятора, соединенные последовательно; 3 — трехходовой дроссель-клапан; 4 — байпасная линия.

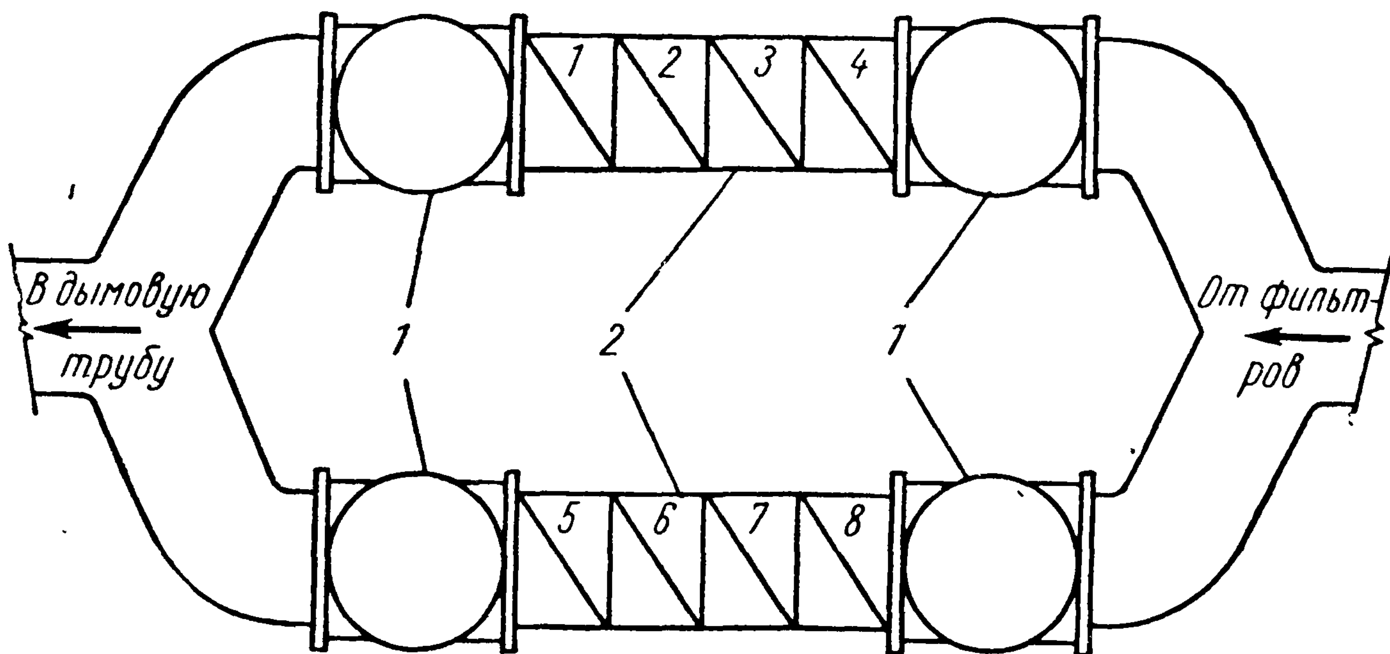


Рис. 9.11. Схема параллельного соединения осевых вентиляторов:
1 — дроссель-клапаны; 2 — четыре осевых вентилятора, установленные последовательно.

Одним из основных условий успешной работы системы является наличие непрерывного воздушного потока. Для этого устанавливаются запасные вентиляторы, а в некоторых случаях байпасные воздуховоды с демпферами.

Для текущего или аварийного ремонта вентиляторов необходимо иметь не зависящие друг от друга воздуховоды. Демпферы должны открываться и закрываться в направлении, обратном воздушному потоку, а так как такой поток обладает значительным скоростным и статическим напором, то для этой цели более подходят демпферы ротационного типа (рис. 9.9). Такие демпферы, кроме того, занимают мало места. На рис. 9.10—9.12 показаны схемы расположения вентиляторов, демпферов и байпасных линий. На рис. 9.13 дана фотография системы, схема которой приведена на рис. 9.10.

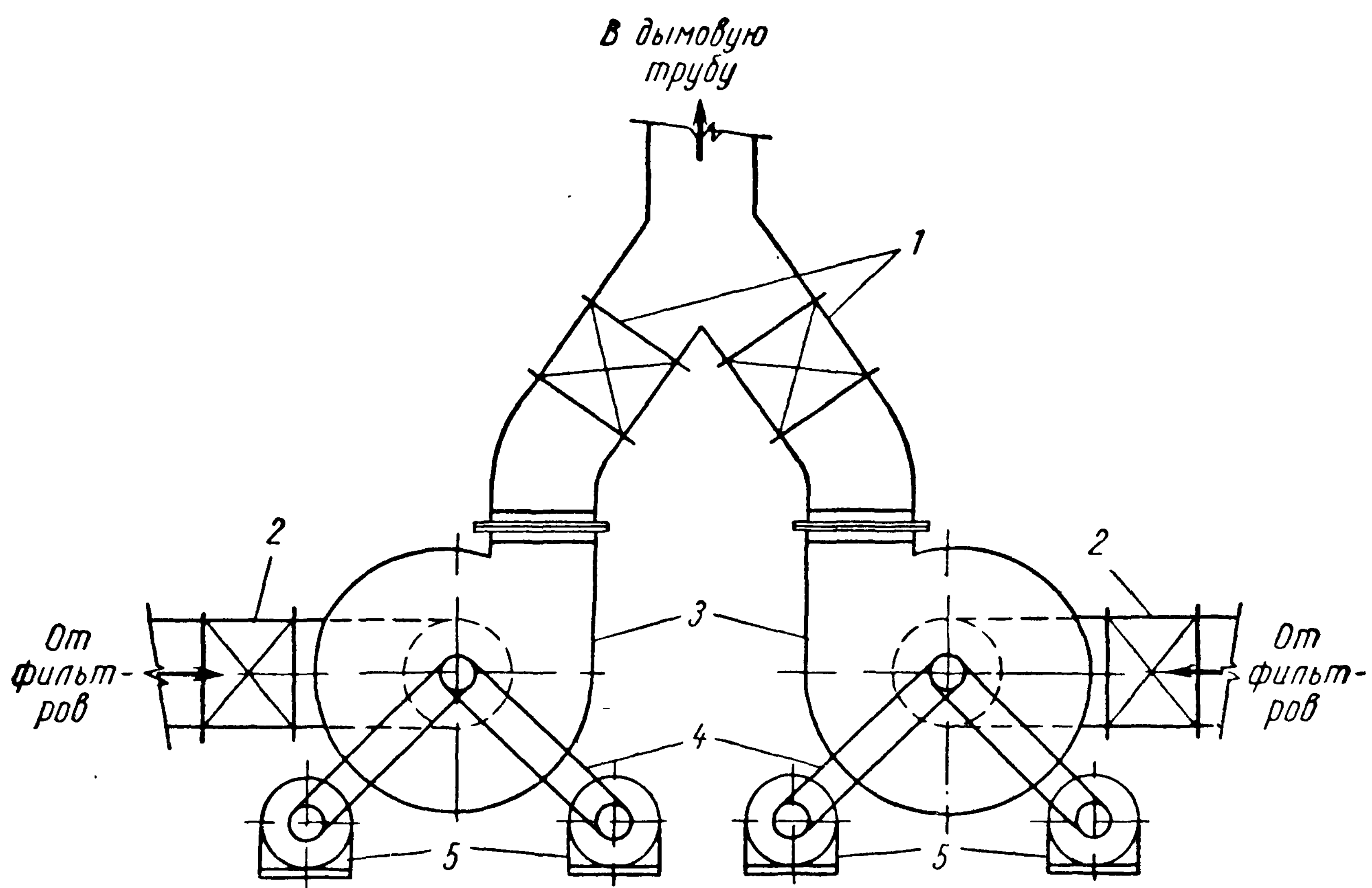


Рис. 9.12. Вытяжные центробежные вентиляторы с дроссель-клапанами:
1 — дроссель за вентилятором; *2* — дроссель на входе вентилятора; *3* — центробежные вентиляторы; *4* — клиноременная передача; *5* — моторы.

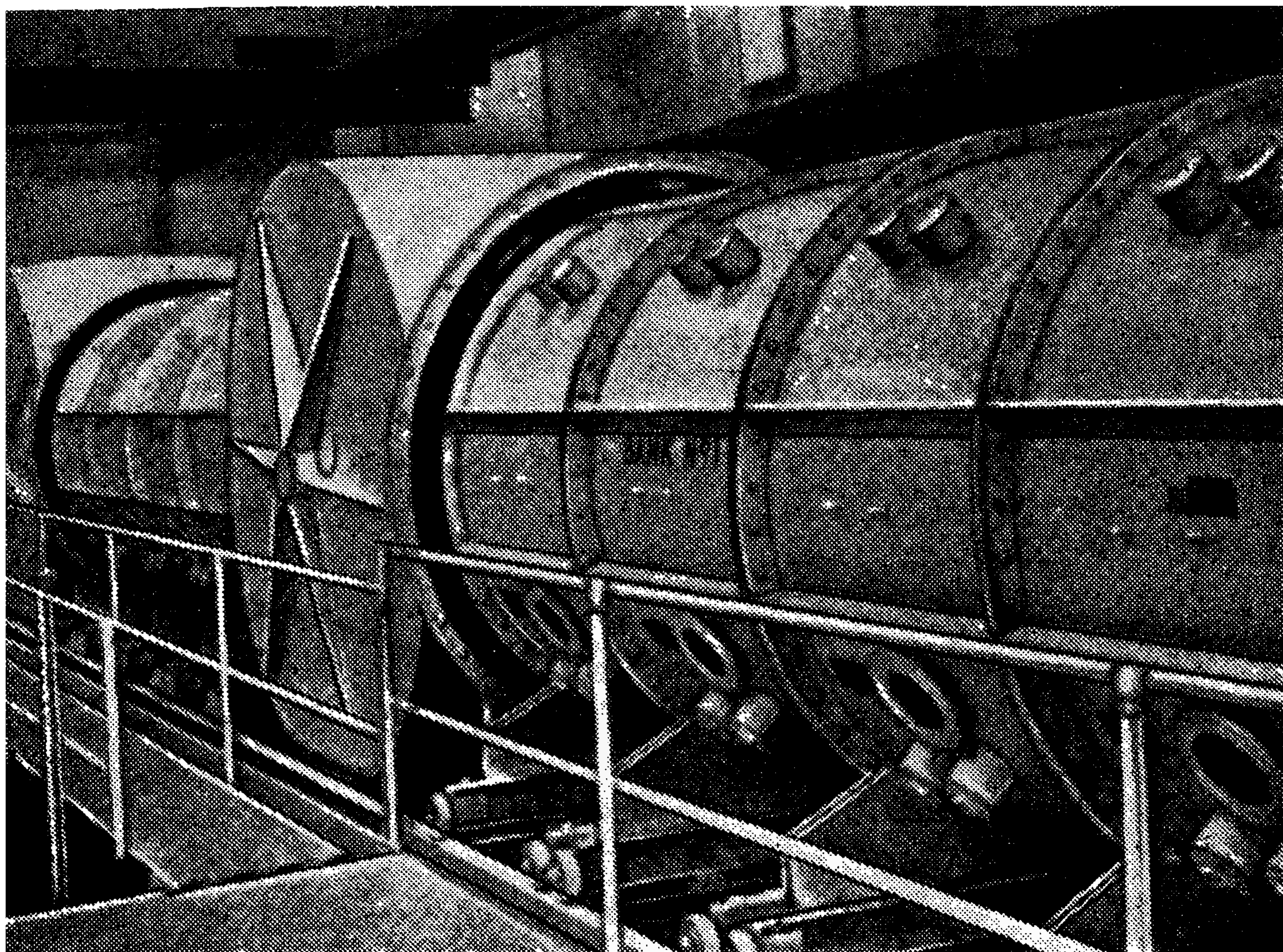


Рис. 9.13. Установка группы осевых вентиляторов

По всей системе необходимы контроль и регулировка расхода и давления воздуха. Для контроля давления в воздуховодах применяют манометры, для регулировки — демпферы. Демпферы, расположенные в различных участках воздуховодов, регулируются во время пуска установки и при изменении схемы системы. Демпферы могут быть с вращающейся дроссельной заслонкой или типа скользящего клапана; манометры трубчатые или (что лучше) наклонно-трубчатые. Система уравновешивается регулировкой демпферов и изменением сопротивления в различных ответвлениях воздуховодов до тех пор, пока в каждой секции не будут достигнуты проектные скорости воздуха и желаемые величины разрежений в производственных помещениях и оборудовании.

Измерение воздушного потока с применением наиболее известных портативных приборов описано ниже. Величину расхода можно определять при помощи любых патентованных устройств. Обычно они состоят из датчиков перепада давления, установленных в воздуховоде и соединенных с дифференциальными манометрами, выходные сигналы которых фиксируются индикатором со шкалой, проградуированной в единицах расхода.

Визуальное определение движения воздуха осуществляется с помощью плоской пластинки, установленной внутри воздуховода. Пластинка жестко связана с указателем, расположенным снаружи. Сопротивление фильтров замеряют манометрами, которые обычно подключаются до и после фильтров в главной приточной системе.

В главной вытяжной системе сопротивление фильтров определяют по дифференциальному манометру, который показывает сопротивление фильтров. Их заменяют тогда, когда их сопротивление становится очень большим или когда вентилятор не может обеспечить требуемой производительности.

Иногда бывает необходимо знать температуру и влажность воздуха, чтобы избежать возможного повреждения фильтрующего материала. Если требуется установка пожарных сигнализаторов на воздуховодах или у группы фильтров, то необходимо тщательно продумать их расположение и тип, чтобы сигнализаторы были эффективными. Кроме того, при некоторых обстоятельствах необходимо, чтобы сигнализаторы приводили в действие огнетушители.

Контрольно-измерительная аппаратура предназначается для контроля работы фильтров, вентиляторов, нагревательных батарей, демпферов, запасных и аварийных установок и т.д. Для сигнализации об энергетических неисправностях (или неисправностях в системе), пожаре, снижении производительности или о полном отсутствии потока используются звуковые и световые сигнальные устройства.

Обычно все измерительные приборы, сигнальные устройства и контрольная аппаратура монтируются на центральном пульте управления (рис. 9.14).

Во впускном и выпускном воздуховодах (т. е. до и после фильтров) должны быть предусмотрены отверстия, через которые отбираются пробы для определения запыленности воздуха. Эти отверстия открываются только при отборе проб.

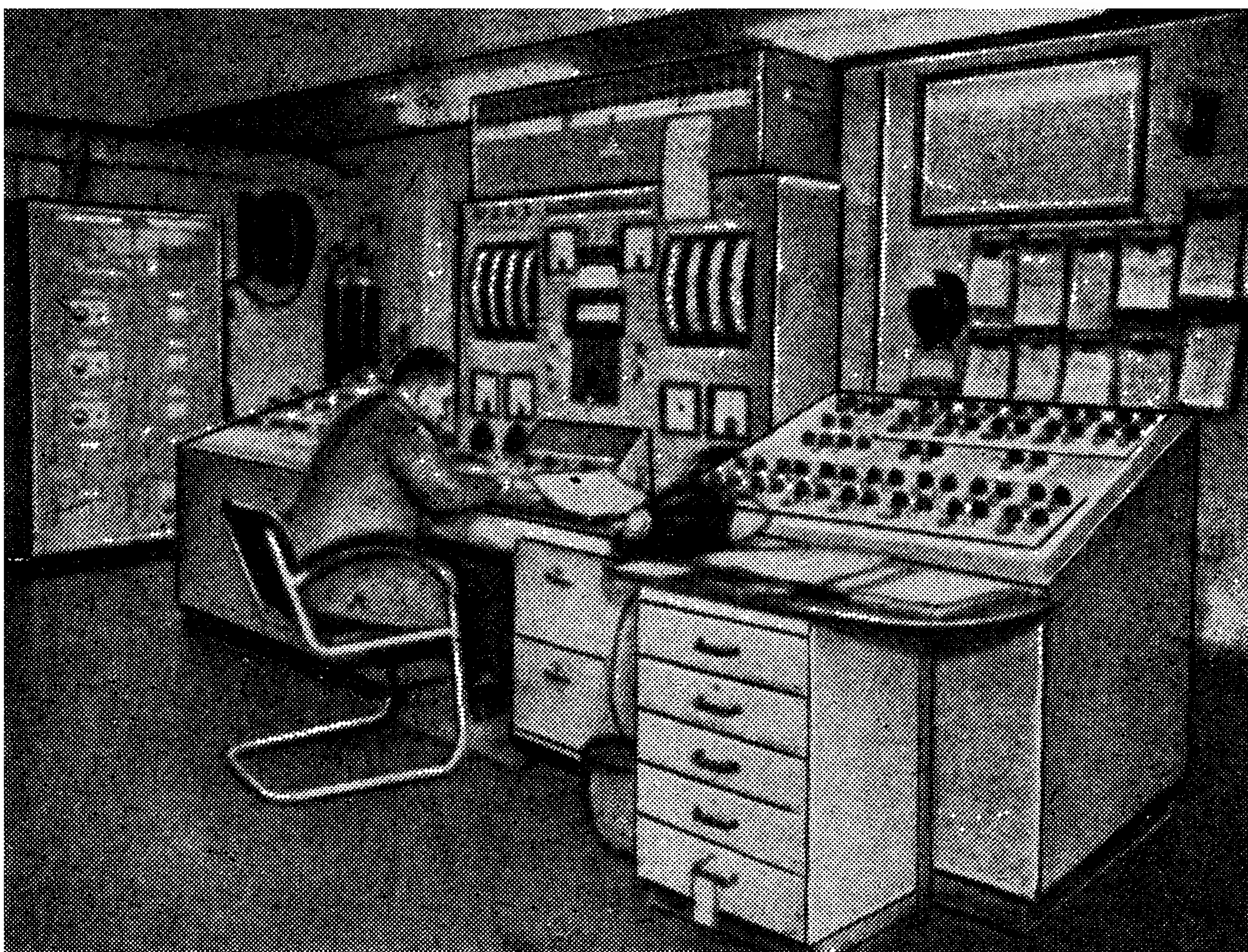


Рис. 9.14. Пульт управления.

Подобные отверстия (короткие патрубки) должны быть расположены по основным элементам системы, чтобы при отладке и эксплуатации системы можно было замерять расход и давление в данной точке.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ

Успешная работа системы очистки в значительной степени зависит от генеральной планировки и конструкции здания, расположения его лабораторий, производственных помещений, мастерских и установок. Обслуживающий персонал должен иметь полную уверенность в безопасности установок и оборудования. Люди, работающие снаружи, а также окружающее население не должны никогда подвергаться опасности. Требования о безопасных условиях работы и снижение капитальных и эксплуатационных расходов часто вступают в противоречие друг с другом. Задача проектировщика — найти оптимальнсе решение, удовлетворяющее в той или иной мере этим требованиям.

Условия работы должны быть такими, чтобы всякое появившееся в воздухе вещество от какого-либо источника, находящегося в рабо-

чих зонах, удалялось через закрытую вытяжную систему и улавливалось в высокоэффективных фильтрах. Конструкцией фильтра предусматриваются специальные устройства для удаления и замены фильтрующей среды, не допускающие вторичного пылеобразования.

Обеспечение безопасности связано с условиями, наиболее важные из которых следующие:

1. Тщательный выбор материалов конструкции:

1) по прочности, чтобы выдерживать возможные аварии в установке или в оборудовании; 2) по устойчивости против коррозии под действием химических или металлургических процессов; 3) по отделке поверхности с целью облегчения обезвреживания, если оно потребуется; 4) по огнестойкости, чтобы противостоять действию пламени, возникающему в зоне или вне зоны фильтрующей установки; 5) по сроку службы, чтобы износ не наступал слишком быстро и не пришлось бы проводить замену в опасных условиях.

2. Надежность и доброкачественность установки, оборудования и материалов, так как эксплуатация, текущий ремонт и замена деталей очень часто проводятся в опасных условиях, требующих специальной защитной одежды.

3. Тщательное планирование обслуживания, текущего ремонта или замены деталей и приспособлений.

Очень часто для обеспечения безопасных условий работы разрабатывается специальная технология проведения отдельных операций. К основным элементам системы безопасности относятся защитная одежда и специальные устройства (прорезиненные защитные костюмы, пневмокостюмы на основе поливинилхлорида, изолирующие противогазы, прозрачные капюшоны с подачей воздуха, туннели для перемещения оборудования и воздушные шлюзы для установок в целом).

4. Наличие запасной установки на случай аварии, при которой воздушный поток уменьшается ниже безопасного минимума. Иногда необходимо дублировать энергоснабжение или устанавливать запасные двигатели, чтобы при аварии обеспечить автоматическое переключение вентиляторов или двигателей. В некоторых случаях монтируются аварийные автоматические вытяжные системы высокого давления.

5. Постоянное наблюдение за условиями работы системы очистки. Хотя для контроля применяются самые простые приборы, значение контрольно-измерительной аппаратуры нельзя недооценивать. Щиты контрольно-измерительных приборов дают сведения об условиях воздушного потока в ключевых положениях системы, о величинах давления до и после фильтров, годности установки и ее режиме работы, об автоматическом включении запасной установки, аварии, отборе проб воздуха для определения активности и о возникновении пожара.

6. Постоянный контроль за работой вытяжной установки и аварийных устройств. Это предохранит как обслуживающий персонал,

так и установку. Например, нагнетание воздуха в оборудование может оказаться опасным, поэтому следует предусмотреть устройства для пуска приточной системы только после включения вытяжной системы. Желательно обеспечить на месте контроль аварийного оборудования и противопожарных средств с использованием инертных газов и системы высокого давления. В некоторых случаях возможна также изоляция или отдельных секций системы, или вытяжной системы целиком.

7. Создание устройств для безопасной эксплуатации и удаления фильтров, контейнеров и другого оборудования.

Таким образом, основные моменты проектирования с учетом требований безопасности должны быть точно определены на ранней стадии, чтобы обеспечить планировку, удовлетворяющую всем этим условиям.

ТИПИЧНЫЕ СХЕМЫ ФИЛЬТРУЮЩИХ УСТАНОВОК

Радиоактивная лаборатория

Рассмотрим типичную установку для очистки воздуха в радиоактивной лаборатории производительностью 160 000 *м³/ч*. Разработка общей технологической схемы рассматривалась в гл. VIII. Здесь мы отметим только некоторые интересные и важные технические детали.

Приточная установка. Свежий воздух всасывается в систему приточной вентиляции через жалюзийные отверстия, проходит через сетки, змеевиковый подогреватель для предохранения от замораживания, а затем через ряд предфильтров, за которыми устанавливаются вентиляторы. Воздух, пройдя через основные фильтры, а при необходимости и через калориферы, поступает в различные рабочие помещения.

Входные жалюзийные решетки с фиксированными направляющими изготовляют из мягкой стали или дерева. Змеевиковые подогреватели с паровым обогревом повышают температуру воздуха до $0° \pm 1{,}5°$ С; они регулируются вручную.

Сетки для улавливания летучего мусора устанавливают поперек нагревательной батареи, их изготовляют из тонкой медной сетки с отверстиями 12 *мм*. Нагревательные батареи повышают температуру воздуха с $-1°$ до $+10°$ С (их сопротивление 3 *мм вод. ст*). В качестве теплоносителя используется пар, температура которого регулируется автоматически.

Батареи первичных сухих фильтров снаряжены нерегенерируемой средой. При лобовой скорости 1,0 *м/сек* их сопротивление не должно превышать 8 *мм вод. ст.*, коэффициент проскока по аэрозолю метиленовой голубой для незапыленных фильтров составляет 30% и уменьшается до 10% по мере забивания.

Главный приточный вентилятор центробежного типа с лопатками, загнутыми вперед, имеет производительность 160 000 *м³/ч*

при температуре воздуха 15,6° С и статическом напоре 100 *мм вод. ст.* Напор вентилятора подбирается с учетом увеличения сопротивления фильтров до 50 *мм вод. ст.* Многопластинчатые демпферы с механическим приводом компенсируют увеличение сопротивления фильтров.

Нагревательные батареи размещены в магистральном воздуховоде. Назначение их — повышать температуру воздуха до 7—24° С (сопротивление 5 *мм вод. ст*).

Контрольно-измерительные приборы включают расходомеры, манометры, термометры и электрическую контрольную аппаратуру.

Магистральный воздуховод, изготовленный из оцинкованного стального листа толщиной 1,6—1,8 *мм* (для скоростей воздуха до 2,5 *м/сек*), оборудован акустической защитой.

Главная вытяжная установка . Фильтрующая секция обрабатывает в час 73 000 $м^3$ воздуха, удаляемого из различных лабораторий, производственных помещений и мастерских, расположенных в радиоактивных зонах.

Воздух из этих зон по воздуховодам поступает в главный вытяжной коллектор помещения вытяжной установки, где расположены воздушные глушители, высокоэффективные фильтры и вентиляторы с демпферами, а затем выбрасывается в атмосферу через дымовую трубу.

Установка состоит из 66 трехступенчатых фильтров коробчатого типа, расположенных одиннадцатью группами по шесть штук. Один фильтр обрабатывает 1700 $м^3/ч$ (коэффициент проскока по метиленовой голубой 0,003%). Начальное сопротивление фильтра 70 *мм вод. ст.* Каждый фильтр состоит из стекловолокнистого предфильтра-искроуловителя и двух высокотемпературных фильтрующих элементов, снаряжаемых стеклянной бумагой.

Установка обслуживается двумя двухпозиционными и одним трехпозиционным ротационными воздухонепроницаемыми цилиндрическими демпферами, восемью осевыми вентиляторами, смонтированными последовательно в два ряда по четыре. Производительность каждого ряда 73 000 $м^3/ч$ при статическом напоре 400 *мм вод. ст.* (температура воздуха 18° С, напор выбран с учетом увеличения сопротивления фильтра).

Для снижения уровня шума глушители установлены как на всасывающей, так и на подающей сторонах вентиляторов. За вентиляторами расположен ряд многопластинчатых демпферов, которые создают искусственное сопротивление при незапыленных фильтрах. Демпферы постепенно открываются по мере увеличения сопротивления фильтра и таким образом поддерживают постоянную производительность вытяжной системы.

В контрольно-измерительную аппаратуру входят манометры, а также приборы для указания воздушного потока и для контроля радиоактивности воздуха.

Воздуховод с фланцевыми соединениями изготовляют из листа толщиной 2,1—3,4 *мм*. Проводится проверка воздуховодов под дав-

лением ±630 *мм вод. ст.* в течение 15 *мин.* Скорость воздуха 2,5 *м/сек.*

Нефильтрующие аварийные вытяжные системы должны удовлетворять указанным выше требованиям.

Пульт управления. Основные приборы, обслуживающие вентиляционную систему, размещаются в центральном пульте управления, который обычно расположен на первом этаже рядом с производственными помещениями и лабораториями, под помещением для вытяжной установки. Вся аппаратура монтируется на панели настольного или настенного типа. Типичное размещение приборов показано на рис. 9.14. Приборы показывают состояние установки и рабочие условия, т. е. включение и годность установки, расход воздуха и температуру, степень очистки. С пульта управления можно изменять рабочие условия, включать и выключать ту или иную установку. Световые и звуковые сигналы сообщают о неисправностях установки. Автоматически включается и выключается аварийная сигнализация, т. е. пожарные сигналы, сигналы критического состояния, уменьшения расхода воздуха, энергетических неисправностей и т. д.

Исследовательский реактор

Вентиляционную систему реактора можно условно разделить на три части (рис. 9.15): реакторный зал; верхняя часть реактора; радиоактивные химические лаборатории.

Вентиляция реакторного зала. Свежий воздух засасывается снаружи через змеевиковый подогреватель, сетки, приточные фильтры и нагревательную батарею. Все эти установки расположены на всасывающей стороне центробежного вентилятора. Сопротивление чистого фильтра равно 4,0 *мм вод. ст.* По мере забивания фильтра оно возрастает до 13 *мм вод. ст.* После этого фильтр заменяется. Очищенный воздух, температура которого контролируется, направляется в реакторный зал через систему воздуховодов, в которых установлен ряд регулируемых решеток для подачи воздуха в обслуживаемые помещения. Из этих помещений воздух удаляется вытяжной установкой через специальные решетки в потолке реакторного зала и далее через систему воздуховодов подводится к установке высокоэффективных фильтров коробчатого типа, эффективность которых по аэрозолю метиленовой голубой составляет 99,65%, а сопротивление возрастает от 45 *мм вод. ст.* для чистых фильтров до 100 *мм вод. ст.* к моменту замены. Вытяжной вентилятор приводится во вращение электродвигателем с переменным числом оборотов, обеспечивающим постоянный расход воздуха независимо от сопротивления фильтра. Затем воздух выбрасывается в атмосферу.

Таким образом, вся система обеспечивает в реакторном зале пятикратный обмен воздуха в час, поддерживает разрежение 13 *мм вод. ст.* и выводит очищенный воздух в атмосферу.

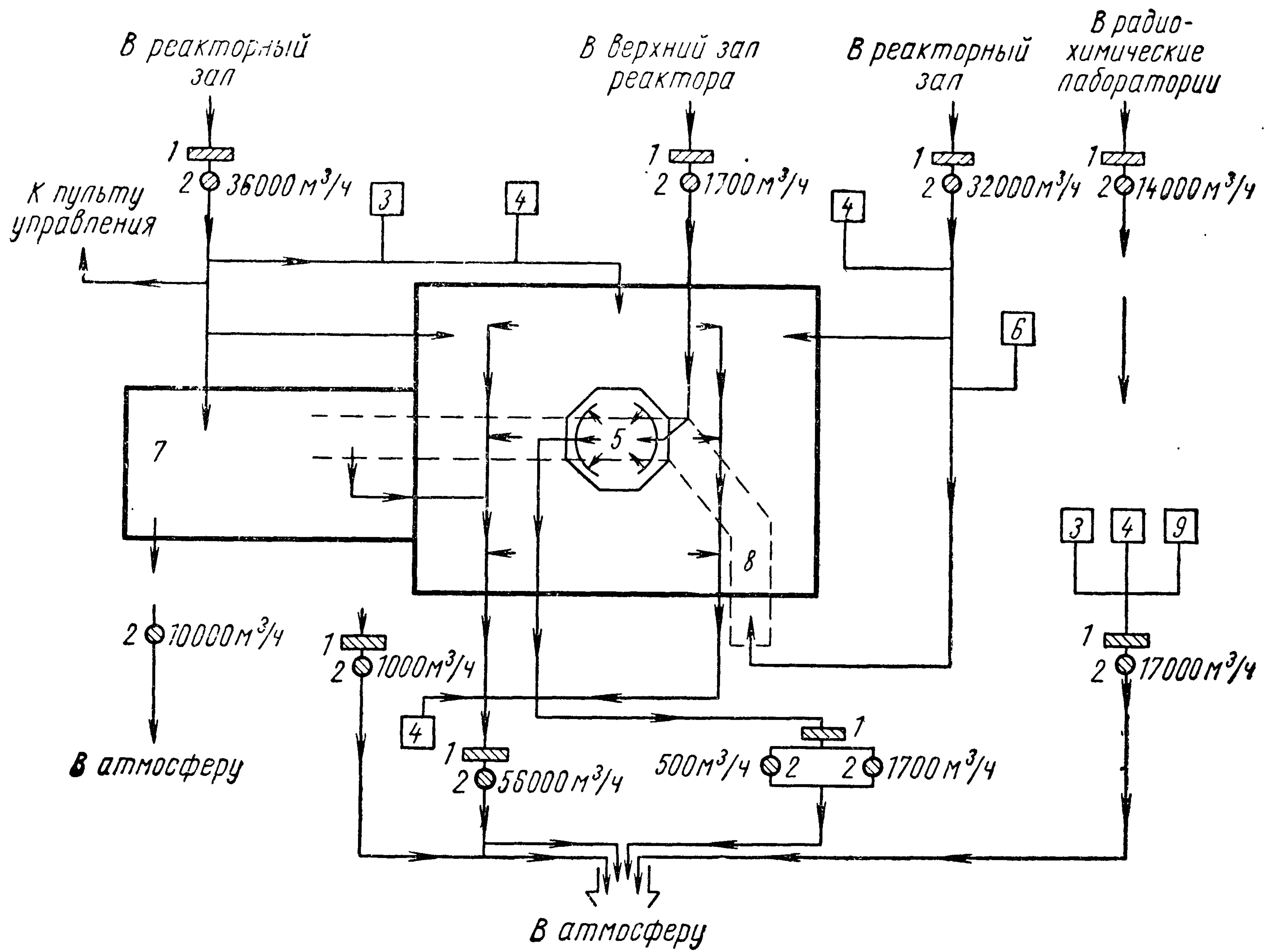


Рис. 9.15. Схема вентиляционной системы исследовательского реактора:

1 — фильтры; *2* — вентилятор; *3* — помещение для переодевания; *4* — помещение для работы с радиоактивными веществами, оборудованное фильтрами; *5* — реактор; *6* — механическая мастерская; *7* — рабочее помещение; *8* — туннель теплоносителя; *9* — радиоактивные лаборатории.

Вентиляция верхней части реактора. Наружный воздух всасывается через установку, подобную описанной для реакторного зала, и поступает непосредственно в верхнюю часть реактора, откуда удаляется вместе с радиоактивными или ядовитыми парами, поднимающимися из резервуара реактора. Загрязненный воздух направляется по воздуховоду к установке высокоэффективных фильтров коробчатого типа, а затем выбрасывается в атмосферу.

Вентиляция радиоактивных химических лабораторий. Воздух всасывается через установку, подобную описанной для реакторного зала, и поступает в различные лабораторные помещения. Из помещений он удаляется через главные вытяжные шкафы по пластмассовому воздуховоду, где возможны коррозийные условия, и подводится к высокоэффективным фильтрам коробчатого типа (коэффициент проскока по метиленовой голубой 0,003%, начальное сопротивление 40 *мм вод. ст.*). При сопротивлении 125 *мм вод. ст.* фильтры заменяются. Вытяжной вентилятор приводится во вращение электродвигателем с переменным числом оборотов, обеспечивающим постоянную заданную скорость воздуха через окна вытяжных шкафов при различном сопротивлении фильтров. Очищенный воздух сбрасывается в атмосферу.

РАБОТА И ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТАНОВКИ

Высокая стоимость установки для высокоэффективной очистки воздуха обусловливает повышенные требования к ее эксплуатации. Инженер-эксплуатационник должен отчетливо знать режимы работы установки и проверять их. Воздуховоды, вентиляторы, фильтры и другое оборудование требуют текущего ремонта. Чтобы свести к минимуму эксплуатационные расходы, необходимо тщательно и подробно изучать эксплуатационные характеристики установки.

Наладочные испытания

Инженер-эксплуатационник должен сотрудничать с проектировщиками и подрядчиком в период наладочных испытаний системы. Он обязан настаивать на проведении инспекций своим персоналом и присутствовать на других испытаниях, результаты которых фиксируются в протоколах испытаний подрядчиков. Инспекция включает визуальный осмотр и испытания под давлением паровых систем и воздуховодов, измерения электрического сопротивления и силовых параметров, определение скоростей вентилятора и производительности системы. Систему следует сбалансировать в соответствии с требованиями проекта, а затем определить действительные расходы воздуха.

Протоколы испытаний всех составных частей установки на заводе-изготовителе представляются заказчику. Из них наиболее важны для инженера-эксплуатационника характеристические кривые (см.

рис. 9.2), так как необходимо знать, в какой точке кривой работает вентилятор, если установка должна работать в определенных условиях.

Необходимо также ознакомиться с протоколами испытаний поставщика по определению эффективности каждого высокоэффективного фильтра. Инженер-эксплуатационник должен лично убедиться в том, что при монтаже принимаются необходимые меры предосторожности по защите фильтров от случайного повреждения и уделяется особое внимание герметичности установки. Если фильтр, предназначенный только для защиты от случайного выделения веществ, не был испытан в период пуска в эксплуатацию, то снижение эффективности вследствие неожиданного повреждения или неправильного монтажа может быть определено слишком поздно.

Здесь не рассматриваются обычно механические и электрические испытания, но некоторые замечания об измерении расхода будут, несомненно, интересны читателю.

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Воздушные потоки можно измерить несколькими методами, но обычно, зная площадь поперечного сечения, замеряют скорость воздуха и определяют расход. Применяется один из трех основных типов приборов в зависимости от размера воздуховода и от того, установлен прибор постоянно или временно. Наиболее распространенными являются анемометр и трубка Пито.

Анемометром замеряют скорость воздуха в очень больших воздуховодах и вентиляционных каналах. Его держат в руках или укрепляют на тонком жестком стержне и по секундомеру отмечают время наблюдаемого отсчета на приборе. Влияние размеров корпуса прибора на точность замеров в очень больших каналах сравнительно мало, но применение его недопустимо в вентиляционных воздуховодах зданий, где можно применять только тонкую трубочку. Для трубопроводов меньших размеров применяется трубка Пито и манометр.

Независимо от типа прибора, следует соблюдать определенные правила, чтобы получить истинное значение скорости воздушного потока для воздуховода в целом. Точка измерения должна находиться в зоне невозмущенного потока (обычно в прямой части воздуховода) на определенном расстоянии от колен, ответвлений или препятствий. Это расстояние равно шести диаметрам для круглых воздуховодов и шестикратной средней длине поперечного сечения для прямоугольных. Трубка Пито вводится в воздуховод через небольшое отверстие, определяются скорости в нескольких точках поперечного сечения и подсчитывается средняя скорость. Рекомендуемое расположение участков, а также другую полезную информацию по измерению скоростей воздуха и по деталям конструкции трубки Пито можно найти в справочниках.

Измерение воздушного потока у решеток

Давление воздуха у входной или выходной решетки обусловлено динамическим напором, поэтому и простая трубка с открытым концом, и трубка Пито покажут скоростной напор. Часто применяют анемометр с вращающимися лопастями, который можно держать непосредственно около решетки при условии, что площадь прибора невелика по сравнению с площадью решетки. Если этот фактор важен, прибор комплектуется простым трубчатым приспособлением, чтобы проверить всю площадь решетки. При любом типе прибора площадь решетки разбивается на участки, а затем определяется средняя скорость.

Постоянно установленные указатели воздушного потока

Пульт управления, приборы которого постоянно фиксируют состояние воздушного потока, показан на рис. 9.14. В качестве датчиков используются приборы, рассмотренные в этой главе, импульс передается к удаленному пульту на показывающие приборы.

Ввод установки в эксплуатацию

В правильно спроектированной системе вентиляции скорости воздуха в воздуховодах соответствуют заданным параметрам. Приток и вытяжка воздуха осуществляются через решетки, за которыми устанавливаются регулируемые демпферы. Размеры решеток и демпферов должны быть такими, чтобы достигался требуемый воздушный поток при частично закрытых демпферах даже при максимальном расходе воздуха. Систематически регулируя демпферы, получают проектируемые воздушные потоки через решетки. Производят это следующим образом.

Вентилятор приточной или вытяжной системы работает при проектной скорости. От вентилятора по направлению к местам входа или выхода воздуха замеряют общие воздушные потоки в нескольких точках. По достижении демпферов их регулируют. Испытания проводятся по технологической системе. Эта схема, составляемая на основании проектной технологической схемы, показывает инженеру-испытателю расположение всех контрольных точек и и требующиеся воздушные потоки.

При испытаниях системы необходимо учитывать взаимное влияние демпферов. Вначале можно установить полную производительность через несколько демпферов, а затем регулировать систему, добиваясь правильного распределения потоков по всем ее элементам. Если при всех открытых демпферах общая производительность вентилятора ненамного превышает проектную величину, то можно установить первые демпферы так, чтобы поток через решетки был несколько меньше проектного. При уменьшении проходного сечения

оставшихся демпферов расход воздуха через первые демпферы будет слегка увеличиваться, так что не надо будет делать подрегулировку. Все результаты испытаний заносятся в технологическую схему испытания, для того чтобы проектировщик и инженер по эксплуатации могли в дальнейшем произвести изменения в системе, зная точные параметры потоков. По окончании регулировки каждый демпфер фиксируется в выбранном положении.

Испытания на месте с применением портативного оборудования для определения эффективности являются единственным средством, благодаря которому можно судить о соответствии всей системы техническим условиям.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ УСТАНОВКИ

При отсутствии нарушений в работе приточной или вытяжной вентиляции и при постоянстве общего потока эта система, вероятно, должна обеспечивать специфические условия в различных помещениях. Пульт управления служит для контроля за общим состоянием системы. Если схемы полностью надежны, оператору не нужно постоянно следить за показаниями приборов. Однако при работе с радиоактивными и токсичными веществами нельзя полностью надеяться на указатели общего потока. Необходимо регулярно контролировать воздушные потоки в важных точках. В особенности это относится к тем устройствам, в которых защита рабочего зависит от воздушного потока в вытяжных шкафах и зонтах. Скорости в воздуховодах и в вытяжных решетках следует сверять с данными первоначальных испытаний. Падение скорости в определенной точке может произойти вследствие каких-либо местных неполадок, например повышенного сопротивления демпфера или неисправности в воздуховодах. Эти причины можно выявить и немедленно устранить.

Следует контролировать ток электродвигателя и скорость вращения колеса вентилятора. Там, где требуется непрерывная работа вентиляционной установки, необходимо один раз в смену делать проверку с записью ее результатов в журнал.

Ранее были описаны методы, с помощью которых можно увеличить воздушные потоки и поддерживать их в заданных пределах регулировкой вентилятора и демпфера. Однако неизбежно наступит момент, когда необходимо будет заменить полностью забитые фильтры. Определить время замены фильтра не так легко. Срок его службы зависит от многих факторов.

Существуют три условия, которые должны выполняться в период работы фильтра: фильтр должен удалять частицы с требуемой эффективностью; через фильтр должно проходить определенное количество воздуха; фильтрующий материал не должен перегружаться. Обсудим подробнее последнее условие.

Обычно при поставке фильтра указываются следующие характеристики: производительность, сопротивление чистого фильтра,

сопротивление фильтра в загрязненном состоянии, изменение эффективности фильтра при его постепенном загрязнении.

Момент замены забитого фильтра определяется его сопротивлением, при котором нагрузка на фильтрующий материал меньше разрушающей. Однако система вентиляторов и демпферов, спроектированная с некоторым запасом, может просасывать воздух через фильтр при большем сопротивлении, чем определено техническими условиями для загрязненного фильтра. Инженер по эксплуатации не должен допускать такого положения, так как оно чревато опасностью разрушения фильтра. Отсюда следует, что необходимо регулярно проверять сопротивление каждого фильтра.

Однако практически невозможно точно измерить расход воздуха через отдельные фильтры, входящие в крупную установку. Обычно известен общий расход воздуха, замеренный в воздуховоде; величина запыленности для каждого фильтра принимается одинаковой. При этом допущении производительность и сопротивление каждого фильтра также должны быть одинаковыми. Но только эти две величины не дают гарантии целостности фильтра. Когда фильтр полностью забит, небольшое отверстие в уплотнении материала может остаться незамеченным, и если оно медленно увеличивается, то уменьшенное сопротивление ограниченной поверхности может быть скомпенсировано увеличением сопротивления остальной площади, где осаждается пыль. Таким образом, сопротивление останется постоянным или будет медленно повышаться, но никаких результатов разрушения фильтра не появится. Поэтому измерения только скорости и сопротивления недостаточно.

Через одинаковые промежутки времени необходимо определять эффективность улавливания фильтра, особенно когда последняя ступень высокоэффективных фильтров не заменяется в течение нескольких лет. При таких условиях становится важным допускаемое напряжение усталости материала. Но пока еще не накоплено достаточно данных о сроке службы новых стекловолокнистых бумаг, чтобы оператор мог полагаться на результаты испытаний.

В отношении фильтров приточной вентиляции часто бывает достаточно определить только общий расход и эффективность (испытание на проскок), так как даже если материал перенапряжен, то любое повреждение можно видеть. Кроме того, при этом не возникает большой опасности.

На вопрос распределения пыли по отдельным фильтрам установки нельзя дать общего ответа. Испытания нескольких фильтров, входящих в одну установку, показали, что распределение пыли в них было неравномерным и уменьшалось по мере удаления от главного впускного коллектора. Картину распределения пыли можно было бы получить по скорости воздуха, но такие данные на месте получить невозможно. Так как большая стоимость фильтров высокой эффективности заставляет добиваться полного срока службы каждого фильтра, то, вероятно, имеет смысл в первые годы работы системы определять все ее характеристики, вплоть до распределения

потока вдоль рядов и между рядами фильтров. Нельзя дать никаких особых рекомендаций по этому вопросу, так как каждая установка будет иметь свои экономические и эксплуатационные характеристики.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Обслуживание механической и электрической части хорошо спроектированной вентиляционной системы несложно. Регулярная смазка, проверка и внимательное отношение к незначительным дефектам гарантируют достаточно продолжительный срок службы системы без капитального ремонта. Ниже рассматриваются принципиальные особенности программы профилактического обслуживания элементов приточной и вытяжной систем. Рекомендуется проводить регулярные проверки, периодичность которых определяется местными условиями и типом оборудования.

Щелевые жалюзи приточной системы проверяются на прочность. Металлические детали могут корродировать и терять герметичность; деревянные детали могут сгнить и часто нуждаются в повторной окраске. Проверяется чистота воздушных сеток с учетом конструктивных особенностей. Удалять сетки из системы следует очень осторожно. Змеевиковый подогреватель осматривается для оценки коррозии. Контролируется характеристика пылеуловителя.

Фильтрующие элементы, смачиваемые маслом, удаляют и вновь промасливают в соответствии с инструкцией завода-изготовителя. Стекловолокнистые и хлопковолокнистые элементы заменяют свежими. Прочность креплений фильтрующих элементов, камеры, люков, шарниров и зажимов проверяют при каждой замене фильтров.

Особо следует рассмотреть метод обработки фильтрующей среды висциновых и волокнистых крупных фильтров, в которых среда укладывается на раме.

Для очистки и смазки висцинового фильтра оборудуется специальный стенд с емкостью для обезжиривания, масляной ванной с подогревом и стеллажом для проверки и сборки. Работа проводится в специально отведенном месте. Рабочий получает соответствующий инструктаж. Он извлекает грязные фильтрующие элементы, поступающие на один из концов верстака, и выполняет последовательно все операции по очистке фильтра. Волокнистые слои удаляют либо отдельно, либо вместе с рамой или корпусом. При раздельной замене элементы осторожно извлекают и удаляют из приемной зоны (по специальной методике). Затем их сразу же укладывают в контейнер. Рамы очищают, проверяют, ремонтируют и снаряжают новым фильтрующим слоем. Очистка съемных рам производится в специальном боксе.

При изъятии фильтрующей среды выделяется значительное количество пыли, поэтому такие операции лучше проводить на открытом воздухе (вдали от заборного отверстия приточной вентиляции), у стеллажа, оборудованного вытяжным колпаком. Рабочему, вероят-

но, нужно одевать противопыльную маску. Рамы очищают проволочными щетками и портативными вакуумными очистителями. Затем при необходимости их ремонтируют. В случае крупных установок может быть выгоднее перебрать отдельные рамы.

Вентиляторы и демпферы

Вентиляторы и двигатели следует осматривать довольно часто. Чрезмерная вибрация указывает на необходимость детальной проверки с разборкой агрегата. При визуальном осмотре определяется состояние ременного привода и гибких соединений между вентилятором и воздуховодами; проверяется подача смазки и уровень шума, надежность шкивов и крепления защитного кожуха. Демпферы, связанные с вентилятором, проверяются подобным образом на надежность соединений и общую конструктивную прочность. Более детальное исследование проводят через длительные интервалы (например, через год) для проверки надежности шкивов, муфт, шпонок при остановленном вентиляторе. Если вентилятор большой, то осмотр и ремонт лопастей крыльчатки, кожухов и траверс ведут через люки. Перед осмотром пыль из вентилятора удаляют. Пластины демпферов следует проверять аналогичным образом.

Приточный воздуховод

В прочно установленных воздуховодах, если по ним пропускается только воздух, обычно не бывает неисправностей. Приточная система не нуждается в проверке, если нет вероятности механического повреждения ее или разрушения под действием коррозии. Проверяются выпускные отверстия решеток, чтобы гарантировать нормальную работу демпферов.

Вытяжной воздуховод

Для вытяжного воздуховода справедливы те же положения, что и для приточного, с той лишь разницей, что в вытяжную систему могут попасть дымы, вызывающие коррозию. Это может произойти только в непредвиденных случаях, так как для правильно спроектированных систем предусматривается полная защита от химически активных дымов.

При обработке токсичных и радиоактивных материалов от состояния вытяжной системы зависит здоровье людей, поэтому необходимо тщательно проверять воздуховод через определенные промежутки времени для обеспечения герметичности всей системы.

Фильтры вытяжной системы

Целостность сборных коллекторов, фильтров, корпусов фильтров так же важна, как и воздуховодов, поэтому их следует подвергать визуальному осмотру. Возможными причинами повреждений

могут быть вибрация, вызывающая разрыв по сварным швам, и коррозия, возникающая вследствие неожиданного появления воды или химически активных дымов. Эксплуатация исправной фильтрующей установки сводится к замене фильтров. Стоимость замены фильтрующих элементов составляет очень большую часть эксплуатационных расходов, особенно для высокоактивной вытяжной системы. Поэтому технология замены тщательно разрабатывается для обеспечения минимальной стоимости работ и безопасности труда.

Замена фильтров вытяжной системы

В вентиляционных системах, обслуживающих производство биологических, высокотоксичных и радиоактивных веществ, применяется несколько типов фильтров. Разработка новых типов фильтрующих сред позволила значительно упростить замену отработанных фильтров. Фильтрующую среду осторожно укладывают в стальной короб со специальными загрузочными и разгрузочными отверстиями. Большое внимание уделяют герметичности среды и корпуса. Затем посредством манжеты короб соединяют с системой, так что его можно легко заменить, когда среда забьется. С усложнением конструкции фильтров были сделаны попытки удешевить и упростить операцию восстановления фильтра, заменяя не весь короб, а лишь фильтрующую среду. Все типы операций кратко описаны ниже.

Замена короба. Типичная операция по замене короба показана на рис. 9.16. Короб соединяют с верхним коллектором посредством муфты, с нижним — с помощью втулки. Сопрягаемые детали коллекторов также выполнены в виде муфты и втулки. Втулка верхнего коллектора телескопическая, т. е. внутри втулки находится короткий патрубок, нижняя часть которого входит внутрь верхней втулки фильтра. Соединительный патрубок можно отвести и зафиксировать в определенном положении внутри втулки верхнего коллектора с по-

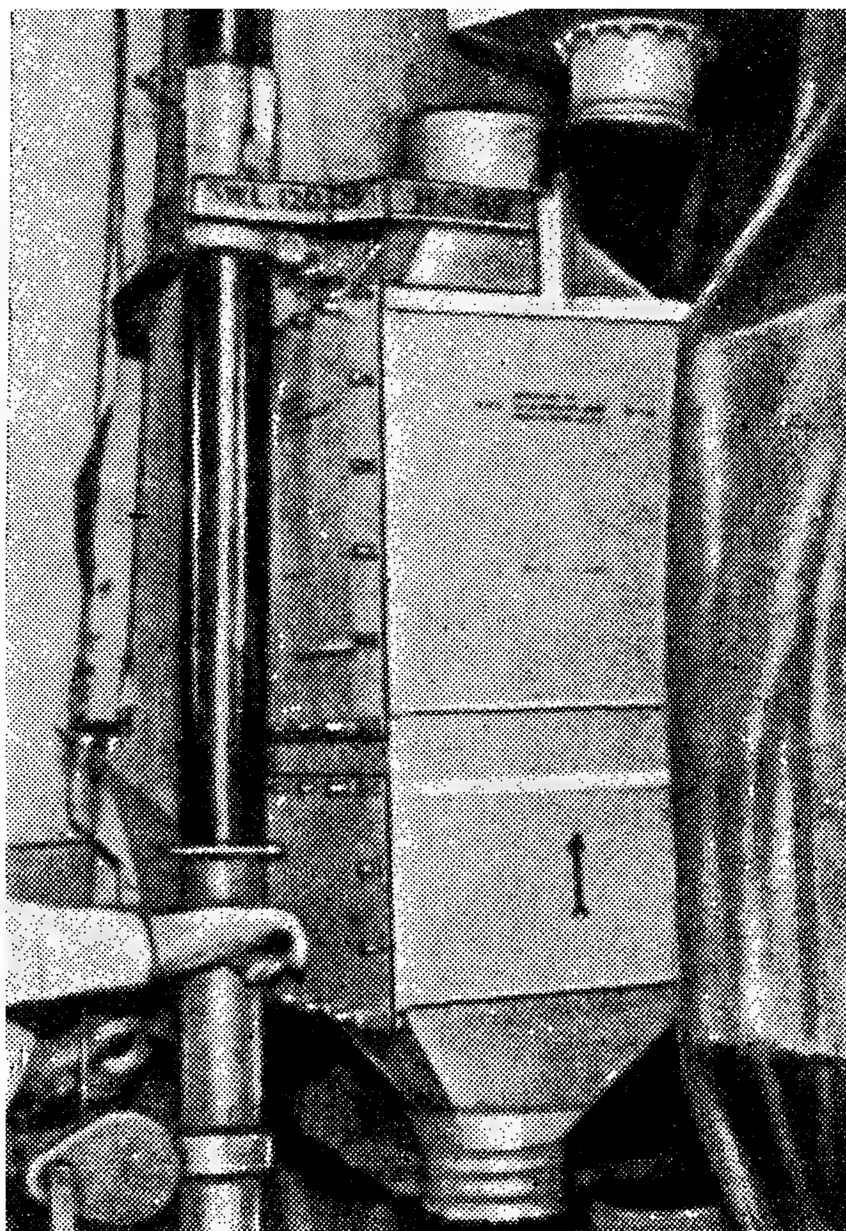


Рис. 9.16 Удаление коробчатого фильтра.

мощью зажима. После установки фильтра втулочное и муфтовое соединения закрывают резиновыми манжетами, зажимаемыми тугими резиновыми кольцами, которые расположены за кольцевыми выступами втулок и муфт. Этот тип соединения показан на рис. 9.7.

Замена короба производится следующим образом:

1) скатывают резиновые кольца, манжеты остаются на патрубках коллектора; если необходимо заменить резиновые детали, их оставляют на патрубках короба; 2) отводят и фиксируют втулочное соединение в патрубке верхнего коллектора; 3) короб поднимают за скобы подъемником или аналогичным механизмом; 4) снимают короб, оставляя соединения открытыми; 5) удаляют фильтр и заменяют его чистым, повторяя операции в обратном порядке.

Рассмотренный метод замены короба довольно прост, но он непригоден при наличии токсичной или радиоактивной пыли. В этом случае необходимо принять меры по ликвидации опасности для обслуживающего персонала и по пресечению возможности распространения токсичных и активных веществ. Для этого необходимо:

1. Одеть защитную одежду, рекомендуемую врачами и работниками техники безопасности.

2. Проверить уровень токсичности во время операций по замене и после них.

3. Во время замены вытяжной вентилятор должен работать, обеспечивая непрерывный отсос пыли от установки и рабочего.

4. Сразу же после удаления короба открытые патрубки короба и коллекторов заглушить крышками, уплотненными изоляционной лентой.

5. Короб опустить в полиэтиленовый мешок и загерметизировать его.

6. Пол, соседние короба и расположенные рядом участки коллекторов закрыть полиэтиленовой пленкой, с которой легко удалить пыль.

7. До проведения операции проинструктировать обслуживающий персонал, чтобы до минимума снизить затраты рабочего времени и обеспечить безопасность.

8. Проводить операцию под наблюдением опытного специалиста.

Использование старого короба и захоронение отработавшей среды. В предыдущем разделе описаны методы замены двухступенчатого короба, изготовленного из мягкой стали. Снаряжение короба фильтрующей средой (стекловолокном, хлопком с асбестом, стеклянной бумагой) производится через две крышки прямоугольной формы. Когда фильтрующая среда забьется токсичными или радиоактивными веществами, возникают вопросы: что дешевле — удаление короба целиком или изъятие лишь фильтрующей среды при соответствующем контроле с использованием старого короба для повторного снаряжения? Однозначного ответа на эти вопросы нет.

Все зависит от местных условий: от наличия дезактивационных средств, срока службы среды, эксплуатационных расходов,

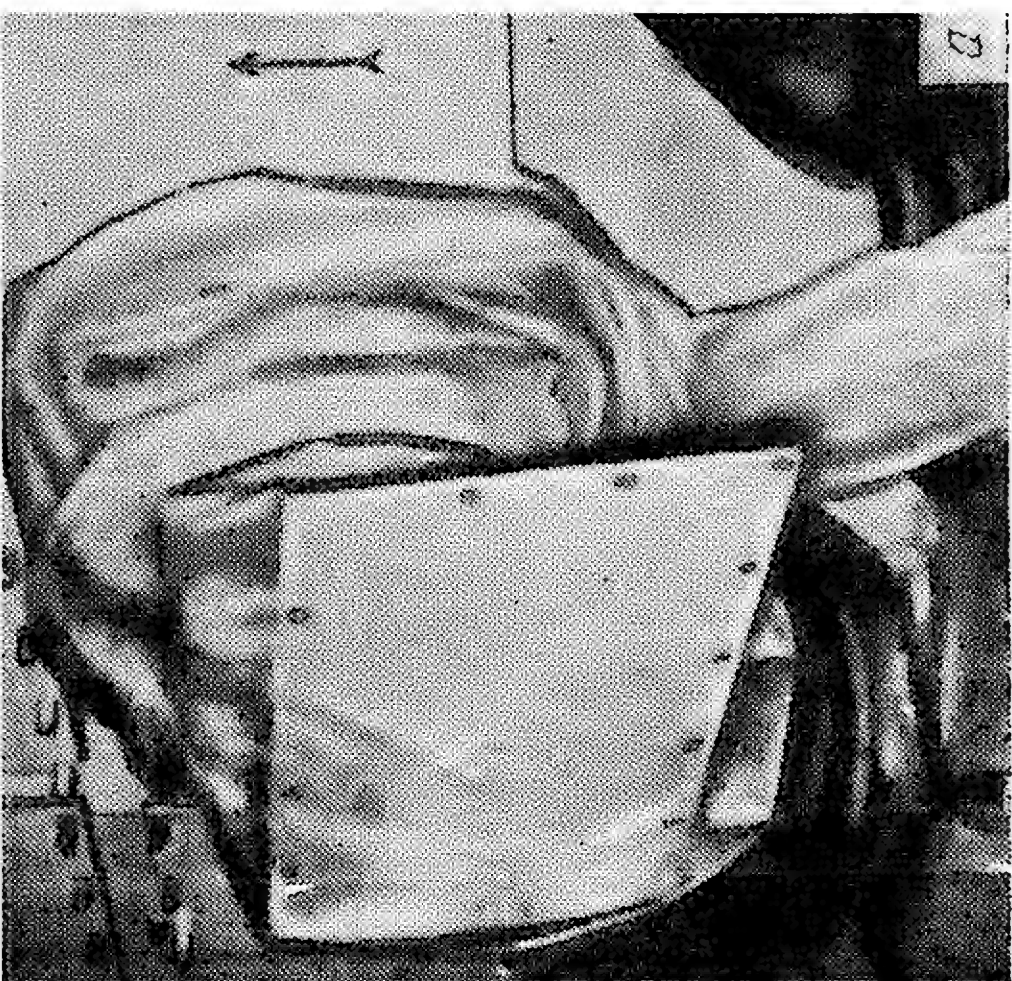
стоимости захоронения и т. д. В каждом конкретном случае необходимо провести экономическое исследование.

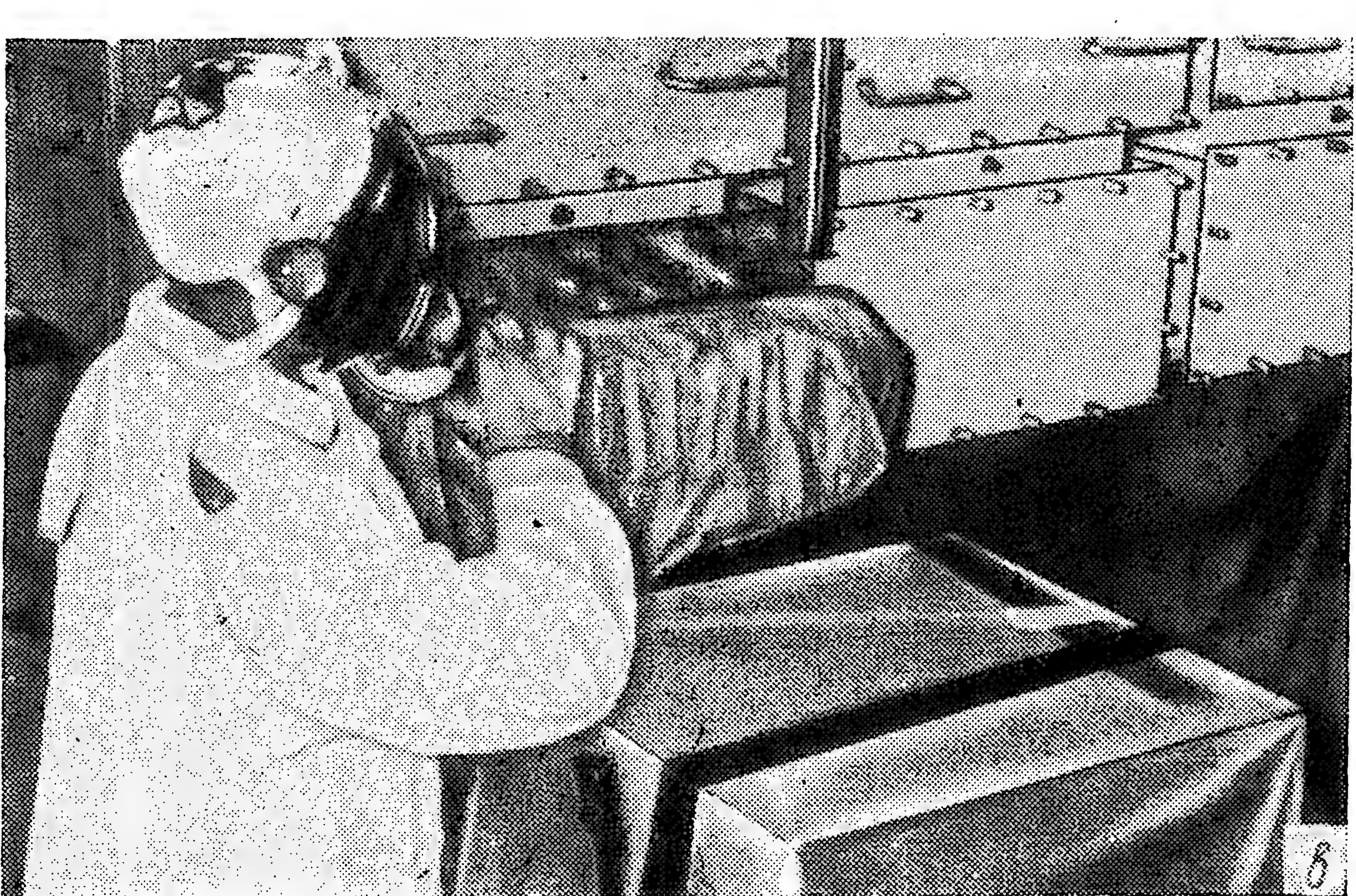
На одном из предприятий принята практика удаления загрязненной фильтрующей среды и повторного использования корпусов фильтров. После определения уровня радиоактивности среду укладывают в пластмассовый мешок и герметизируют. В зависимости от уровня радиоактивности среды производится захоронение либо в землю, либо в море. При захоронении в землю фильтрующую среду транспортируют в специальном контейнере и в специально отведенное место. При захоронении в море среду укладывают в бетонный контейнер со стальным кожухом. Для среды фильтра производительностью 1700 $м^3/ч$ с размерами 600×600×300 *мм* применяется контейнер диаметром 760 *мм*, длиной 1600 *мм* и весом 900 *кг*. Приблизительная стоимость захоронения такого фильтра в земле 1 ф. ст., в море — 10 ф. ст. Продолжающиеся работы по уменьшению объема среды путем упаковки в кипы и тюки позволят значительно сократить расходы по удалению и захоронению.

Замена фильтрующей среды на месте. В системах очистки на заводах, обрабатывающих радиоактивные и токсичные вещества, используется несколько типов фильтрующих материалов. В зависимости от сложности замены степень опасности различна. Ниже рассмотрены операции подобного типа, начиная с простой и кончая сложной. Описан также метод замены фильтров в системе, разработанной недавно в Англии, по которому замена проводится внутри короба.

Замена среды, связанная с незначительной опасностью. Типичный пример такой операции можно найти в системах улавливания бериллиевой пыли, отсасываемой из рабочих камер и помещений, предназначенных для литейных и механических операций. Следует отметить, что это вовсе не говорит о малой токсичности бериллия. Основная цель — не превышать ПДК даже в помещении для установки; это достигается тщательным выбором метода замены, чисткой воздуховодов в соответствии с требованиями проекта и расположением системы. Предполагая, что характеристика системы известна, что в момент замены действительное количество бериллиевой пыли в фильтре не слишком велико и пыль не является тонкой и сухой, разлетающейся при малейшем движении, и что вокруг фильтра достаточно много свободного места для осторожной работы, можно успешно применять следующий метод. В этой установке короб кубической формы с двух сторон имеет съемные фланцевые крышки. При замене фильтрующей среды обе крышки осторожно снимают и укладывают на лист из пластика. При необходимости грязная сторона крышки очищается с помощью вакуумного отсоса или мокрой уборкой. Далее на открытый люк с одной стороны накидывают мешок из пластика, и в этот мешок с другой стороны выталкивают фильтрующую среду. Если среда достаточно жесткая, то отработанный элемент легко выталкивается новым элементом. Вытяжной вентилятор должен работать в течение всей операции.







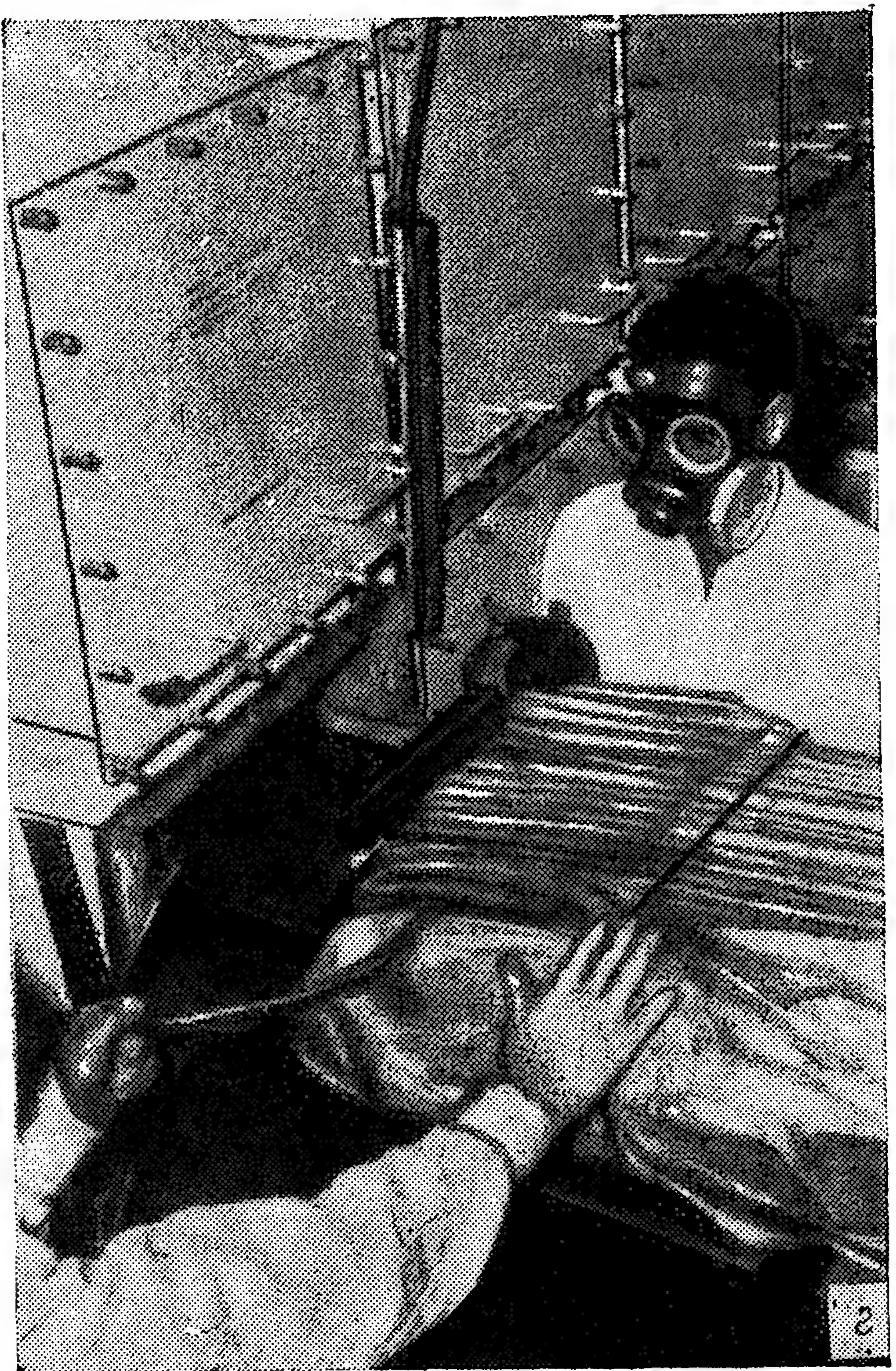


Рис. 9.17. Удаление фильтрующего элемента:
а — мешок со снятой крышкой; *б* — герметизация нижней части мешка с крышкой; *в* — элемент частично выдвинут и стянут; *г* — элемент изъят полностью и загерметизирован.

Удаление среды, представляющее серьезную опасность. Процесс удаления среды начинают с того, что отворачивают гайки крепления крышки на одной стороне короба. Угловые гайки на время операции заменяют барашковыми для обеспечения герметичности.

На крышку люка надевают длинный пластический мешок, внутри которого находятся инструменты, необходимые для изъятия фильтрующего элемента. Съемный элемент извлекают из корпуса скребковыми пластинами, состоящими из рычагов с отогнутыми назад зубьями и рукояток. Скребковые пластины перемещаются по направляющим элемента с двух сторон, зацепляют материал и вытягивают его. В корпусе поддерживается разрежение 13 *мм вод. ст.* Для этого прикрывают демпфер и подбирают положение шибера короба. Затем крышку снимают, передвигают к донной части мешка и заваривают при помощи портативного теплового приспособления (рис. 9.17). В укороченный мешок скребковыми пластинами заводят фильтрующий элемент, и мешок вновь заваривают. На фланце люка остается висеть короткий кусок мешка.

Установка нового элемента, связанная с серьезной опасностью. В чистый мешок укладывают свежий фильтрующий элемент и чистую крышку. Мешок закрепляют на фланце люка поверх старого мешка. Затем старый мешок снимается внутрь нового, в корпус устанавливается свежий элемент и закрывается крышкой. Чистый мешок, в котором находятся остатки загрязненного, заваривается.

Для того чтобы элемент легко входил в короб, его сжимают тонкими боковыми пластинами и фиксируют в этом положении вместе с мешком. Перед элементом располагают специальный карман, в который укладывают старый мешок. Если карман будет выступать внутрь мешка, то находящийся в нем старый мешок может выпасть. Обычно карман делают сбоку, укладывают в него старый мешок, заваривают и отрезают. В этом случае фильтрующий элемент беспрепятственно проходит внутрь короба (рис. 9.18). Такой же карман удобно сделать и для чистой крышки, чтобы уменьшить опасность загрязнения крышки и не допустить повреждения элемента при его установке в короб.

Иногда элемент не встает на место даже при помощи крышки. Тогда делают сжимающее приспособление, которое захватывает фланцы, и через пластину снаружи мешка винтовым домкратом создается давление на крышку.

И, наконец, мешок снимают, скручивают и заваривают, а крышку проверяют на загрязнение.

Замена жесткого фильтрующего элемента. Операция замены жесткого элемента значительно проще, так как отпадает необходимость использовать съемные и сжимающие приспособления.

Замена фильтров в крупных установках. Одним из последних достижений конструкторов является создание крупной фильтровальной установки минимального объема. Особенностью этой конструкции является безопасность при замене фильтрующих элементов (без удаления корпуса). Фильтрующая установка состоит из

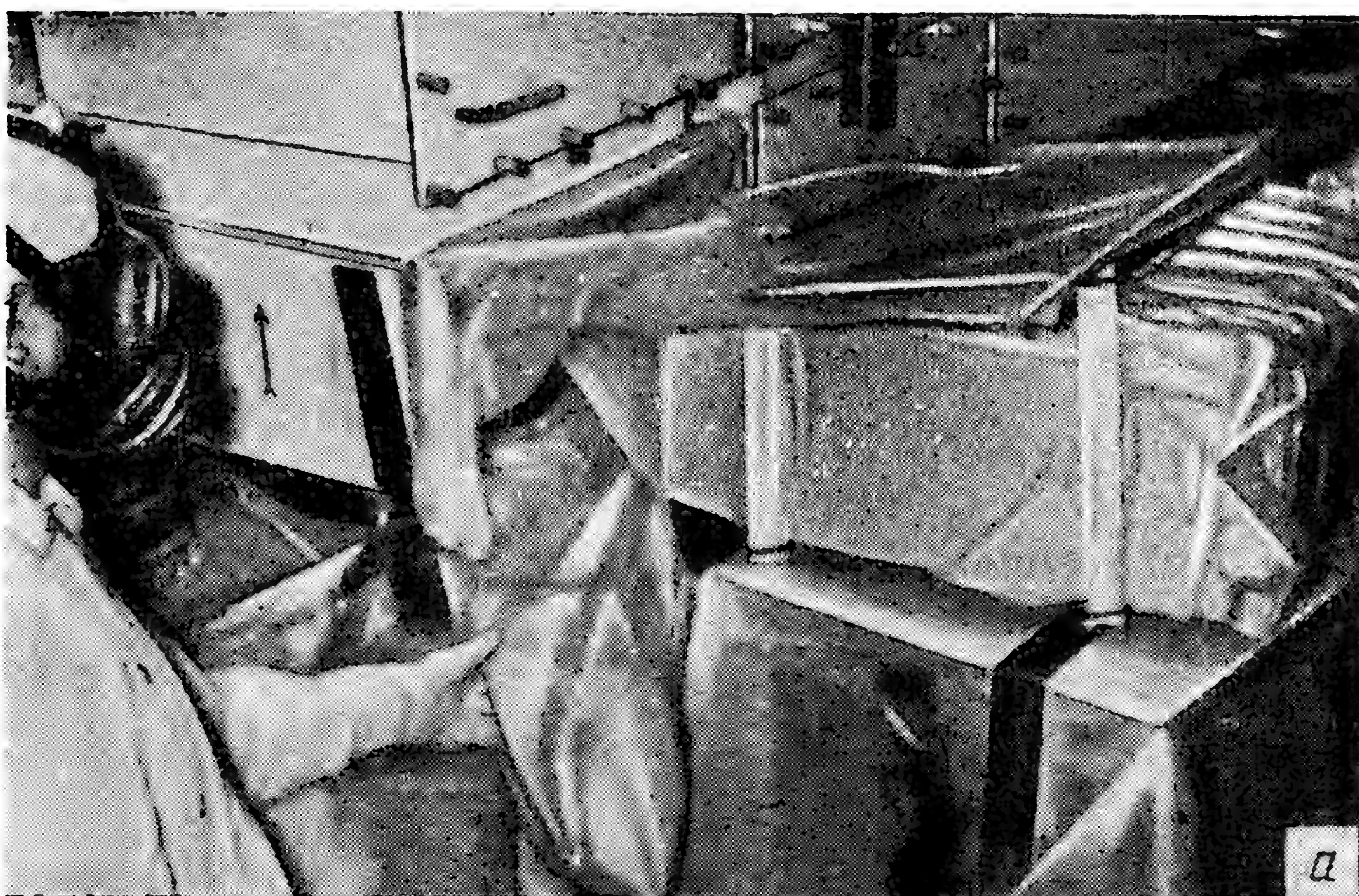




Рис. 9.18. Установка нового фильтрующего элемента:

а — остатки загрязненного мешка удалены; новый элемент готов к установке; *б* — установка нового элемента.

батареи фильтров производительностью 1700 $м^3/ч$ каждый, размещенных горизонтально между впускным и выпускным коллекторами. Каждый фильтрующий элемент закладывается в отдельную камеру с двумя съемными крышками (рис. 9.19). Метод замены отличается от описанного ранее тем, что короткий полиэтиленовый мешок постоянно находится внутри короба. Фильтрующая среда (стеклянная или асбестовая бумага), собранная в складки, заключается в металлическую или деревянную раму.

В корпусе фильтрующий элемент уплотняется кулачками, прижимающими прокладку элемента к наружной верхней части короба со стороны входа воздуха. Кулачки приводятся в действие рычагами. Элемент освобождается при повороте рычага в горизонтальное положение.

Для закрепления мешков при замене элемента предусмотрен эллиптический фланец с двумя кольцевыми пазами по периферии. При работе люк закрыт коротким мешком, заправленным в паз,

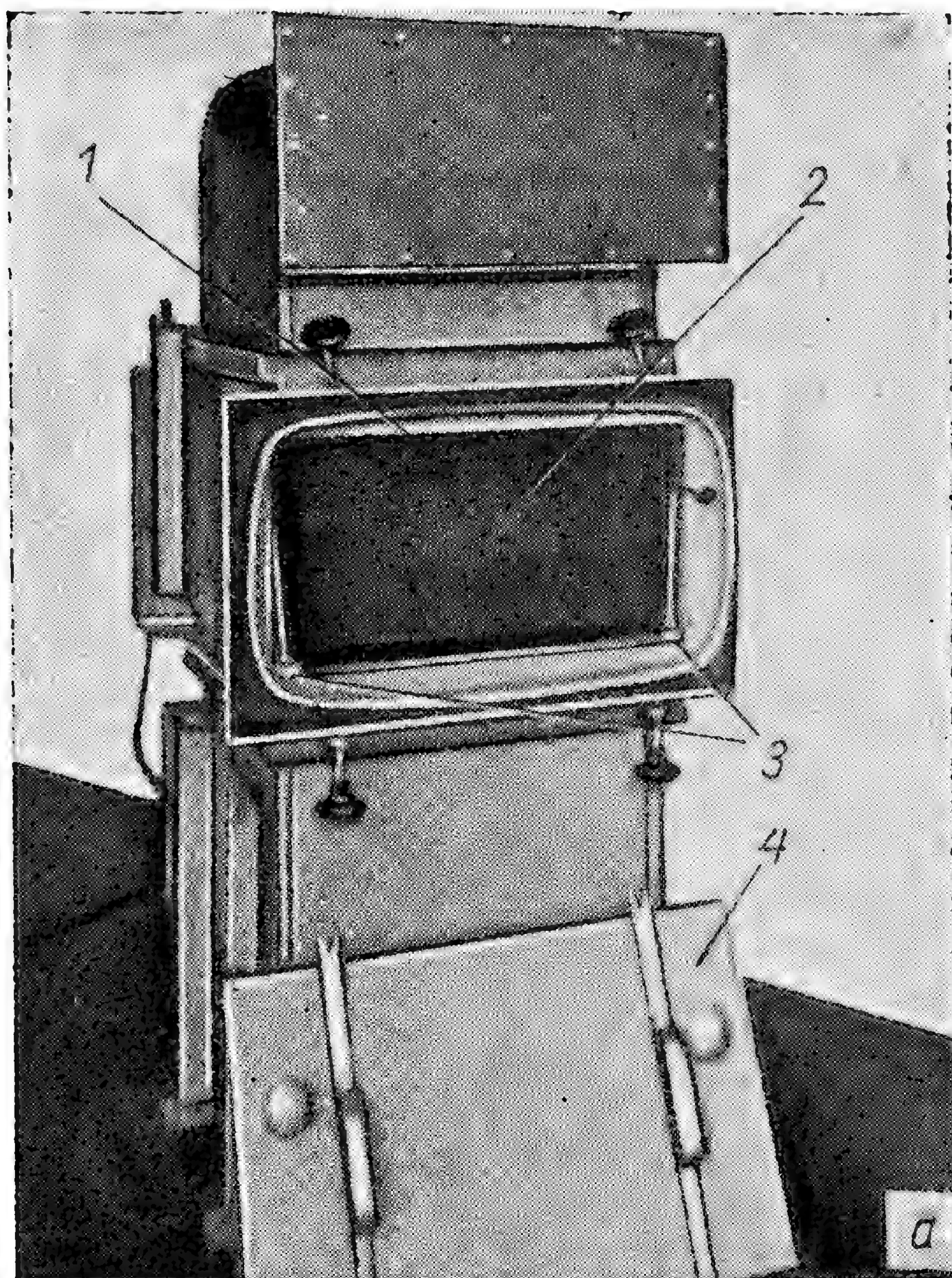
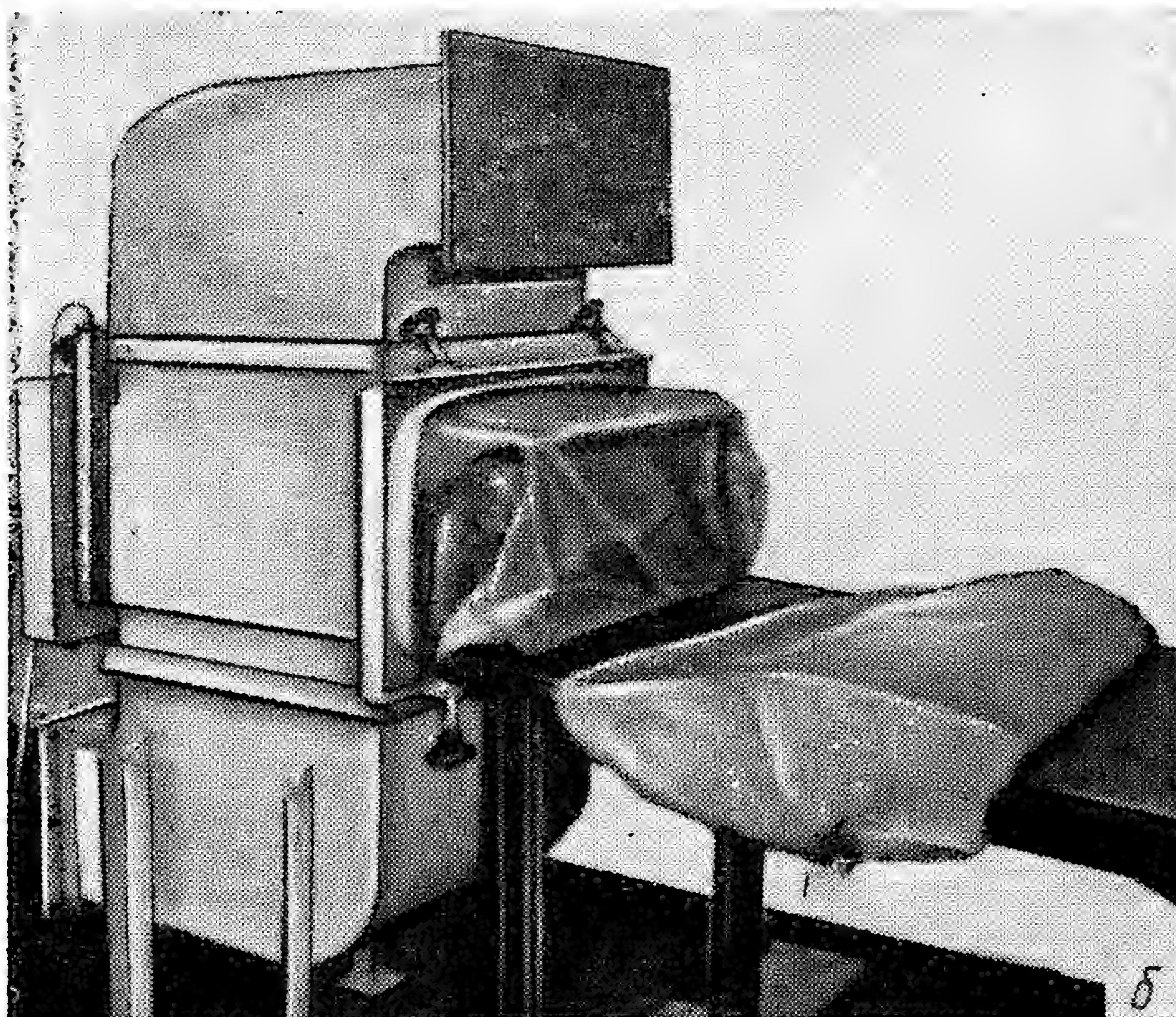
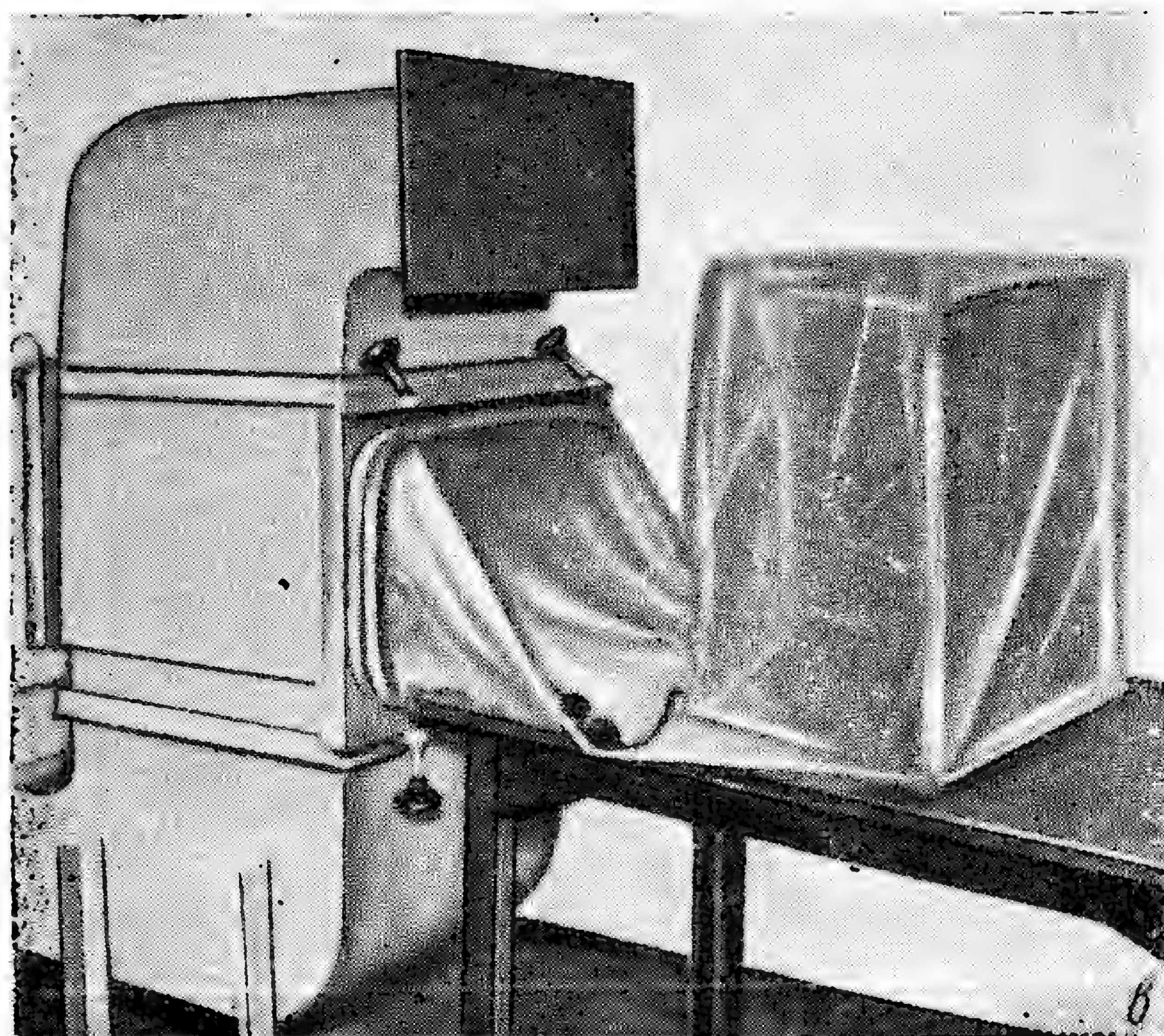


Рис. 9.19. Установка со сменным фильтрующим элементом:

а—общий вид опытного фильтра; *1*—поверхность уплотнения; *2*—фильтрующий элемент; *3*—кулачки; *4*—крышка; *б*—фильтрующий элемент выдвинут в короткий мешок; *в*—фильтрующий элемент подготовлен для герметизации.


б


в

и крышкой, которая крепится откидными зажимами. Для замены элемента необходимо снять крышку и освободить элемент выведением рычага привода кулачком из горизонтального положения (через мешок). Во время операции в фильтре поддерживается разрежение порядка 10 *мм вод. ст.* Далее элемент выдвигается из корпуса в короткий мешок (см. рис. 9.19, *б*), поверх которого надевается длинный мешок, закрепляемый за внутренний кольцеобразный паз. Таким образом, элементы вместе с коротким мешком оказываются внутри длинного мешка, в котором они завариваются с помощью портативного приспособления (см. рис. 9.19, *в*).

Монтаж нового элемента проводится в обратном порядке. Элемент зажимают кулачками, а короткий мешок на фланце и оставшийся загрязненный мешок заваривают в наружной части длинного мешка, в котором устанавливался новый элемент. Во время этой операции ни загрязненный элемент, ни рабочая камера не контактируют с окружающим пространством.

Чистка воздуховодов

На выбор скорости потока при улавливании токсичной пыли оказывают влияние многие факторы, часто противоположные, и поэтому приходится принимать компромиссное решение. Выбранная скорость не всегда достаточно высока, чтобы предотвратить осаждение частичек из потока даже в прямых участках воздуховодов. Более интенсивное осаждение происходит в местах различных соединений и изгибов, т. е. там, где возможна турбулизация потока. Для пылей, которые улавливаются в высокоэффективных фильтрах, огромное значение имеет чистота подводящих воздуховодов. Поэтому через определенные промежутки времени необходимо проводить чистку воздуховодов.

На количество оседающей пыли влияют и такие факторы, как повышенное выделение ворсистых отходов, попадание в систему брызг смазочного масла или эмульсии. Таким образом, в худшем случае на внутренних поверхностях воздуховодов вытяжной системы может образоваться слой из ворса и частиц токсичного вещества, смоченный маслом. Очень серьезная опасность возникает тогда, когда пыль пирофорна. Как указывалось в гл. VIII, первая фильтрующая ступень должна располагаться по возможности ближе к источнику пылеобразования, чтобы избежать осаждения пыли в воздуховодах. Чистка воздуховодов — это утомительная, дорогая и неприятная операция, и весьма важно проводить ее на высоком организационном и техническом уровне. При составлении технологии очистки воздуховодов, забитых вязкой пылью, необходимо соблюдать следующие основные положения.

1. Планирование и выполнение операции должно проводиться в соответствии с приемами по обслуживанию токсичной установки.

2. Перед выполнением операций рабочие должны быть тщательно проинструктированы.

3. Работа должна выполняться под наблюдением опытного специалиста.

4. Должны соблюдаться правила техники безопасности.

5. Во время операции необходимо отбирать пробы воздуха и осадка.

Процесс очистки зависит от размеров и формы воздуховода. Наиболее удобен большой воздуховод, в который можно войти и вручную вычистить. Воздуховоды меньших размеров чистят щетками через специальные люки.

Вход для людей в большом воздуховоде тщательно герметизируется. Около входа возводится каркас из перфорированных уголков, который покрывается прозрачной пленкой и образует своеобразный тамбур. Основное назначение его — не допустить распространения токсичных и радиоактивных веществ. В зависимости от типа пыли и степени загрязнения рабочие одеваются в ту или иную защитную одежду. По возможности в воздуховоде одновременно должны находиться двое рабочих. Начиная с наиболее удаленного от фильтра участка, рабочие должны проскрести, вычистить и вымыть с применением моющих средств и воды весь воздуховод. Отколотые куски нароста собираются в полиэтиленовый мешок для захоронения.

Воздуховод промывается водой с моющими средствами с помощью мягких щеток и просушивается бумагой, хорошо впитывающей воду. Рабочие должны тщательно осмотреть воздуховод и о всех замеченных повреждениях доложить ответственному наблюдателю. После очистки мешки с пылью, бумага извлекаются из воздуховода и укладываются в общий мешок, который заваривается и направляется на захоронение. Перед закрытием люка качество работы проверяет ответственный наблюдатель. Полиэтиленовый тамбур снимают и чистят от пыли. Площадку возле люка проверяют на чистоту.

Эксплуатация вытяжной трубы

Вытяжные системы, обслуживающие технологические процессы с радиоактивными материалами, обычно работают непрерывно. Так как эти системы выбрасывают нагретый воздух, коррозия внутренней поверхности труб незначительна или ее вообще нет, в особенности если труба покрашена. Следует предусмотреть осмотр и окраску и внешней поверхности трубы. Обычно труба осматривается специалистом-верхолазом один раз в три года.

При отсутствии каких-то специальных условий эксплуатации проверка ограничивается визуальным осмотром и остукиванием молотком. В отчете по проверке подробно указывается состояние поверхности. Трубы окрашиваются раз в три—семь лет. Периодичность окраски обусловливается местоположением выхлопной трубы по отношению к источникам коррозии в окружающей атмосфере.

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ УСТАНОВКИ ФИЛЬТРОВ

К настоящему времени основные положения и технические приемы эксплуатации установок разработаны достаточно хорошо. Следует обратить внимание на постоянное повышение требований, предъявляемых к системам очистки, которые должны обеспечивать безопасные условия труда в любом месте при минимальных затратах. Затраты, складывающиеся из стоимости управления и обслуживания, оказывают заметное влияние на окончательную стоимость очистки воздуха, а также на выбор схемы установки, степень очистки и используемое оборудование. Сконструированные десять лет назад опытные и промышленные установки для высокоэффективной очистки воздуха в атомной промышленности занимали 50% общих производственных площадей и объемов. Сейчас эта цифра снижена до 20% без уменьшения эффективности очистки.

Очевидно, экономия площади означает сокращение капитальных затрат. Тем не менее эксплуатационные расходы и стоимость вытяжных и фильтрующих систем с высокоэффективной очисткой всегда будут намного выше по сравнению с обычными системами.

При выборе той или иной системы очистки следует учитывать следующие факторы, влияющие на величину капитальных и эксплуатационных затрат:

1. Высокоэффективные фильтры применяют только в том случае, когда необходимость их установки не вызывает ни малейшего сомнения. Выбранная схема оформляется конструктивно в соответствии с требованиями высокоэффективной очистки.

2. Кратность воздухообмена должна быть снижена до минимума, допускаемого нормами техники безопасности и обеспечивающего нормальные рабочие условия. Это позволит снизить расход энергии.

3. Степень использования производственных площадей должна составлять в среднем 75%.

4. При улавливании частиц опасных веществ необходимо очень четко планировать всю работу. Это позволит свести к минимуму частоту замены фильтров.

Глава X

ЭКОНОМИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ФИЛЬТРОВ

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Высокоэффективная очистка воздуха обходится значительно дороже, чем обычные виды «грубой» очистки. Поэтому дальнейшая разработка более эффективных систем, удовлетворяющих соответствующим требованиям и характеризующихся более низкими капитальными и эксплуатационными расходами, является сложной инженерной задачей. В этой главе сделана попытка представить основные данные по стоимости оборудования и эксплуатационным расходам, раскрыть некоторые факторы, определяющие экономические показатели, и рассмотреть перспективы совершенствования этих систем, которые связаны в основном с использованием более современных типов фильтров и другого оборудования.

Стоимость вытяжной вентиляции

При расчете экономических показателей вытяжной вентиляции обычно учитывают стоимость самой вытяжной установки (включая вентиляторы, фильтры, трубы, специально сконструированные воздуховоды к центральной станции обработки воздуха, некоторые специальные ограждения и местные пылеотсосные устройства, используемые в рабочих помещениях) и стоимость сооружения систем управления и контроля воздушных потоков, устройств, предотвращающих поступление атмосферной пыли, воздухозаборных устройств для обеспечения работы вытяжной системы, исключая общеобменную вентиляцию и расходы на отопление.

Необходимо также учитывать стоимость замены фильтров, включая стоимость работ в условиях, обеспечивающих защиту работающих и безопасное удаление и уничтожение фильтров. Прежде чем рассматривать общую стоимость очистки воздуха такими системами, следует остановиться на стоимости составляющих элементов этих систем, в частности, фильтров и соответствующих им предфильтров.

При эксплуатации фильтры забиваются, поэтому, во-первых, необходимо сбалансировать стоимость замены фильтра со стоимостью энергии, расходуемой вентилятором при росте сопротивления. Во-вторых, должны быть сбалансированы сроки между сменами конечных высокоэффективных фильтров со стоимостью более дешевых предфильтров или других предварительных очистных сооружений, используемых для увеличения сроков их полезной службы.

Стоимость фильтров

Ранее уже отмечалось значительное преимущество современных компактных фильтров с развернутыми фильтрующими бумагами перед старыми установками малой производительности (табл. 10.1).

Таблица 10.1

Типовые ориентировочные стоимости высокоэффективных фильтров без предфильтров

Тип фильтра	Производительность, $м^3/ч$	Стоимость, ф. ст.	
		фильтра	замены фильтра
Асбесто-шерстяной в цилиндрическом корпусе	61	30	30
Шерстяно-смоляной в цилиндрическом корпусе	306	15	15
Складчатый хлопко-асбестовый в корпусе (с заменяемой средой)	340	70	30
Складчатый с фильтрующей бумагой в корпусе (с заменяемой средой)	1700	45—50	15—20
Складчатый со стекловолокнистой бумагой (в несгораемой конструкции):			
сменный	1700	65—70	35
выбрасываемый	1700	40	40
»	306	33	33

Если срок службы высокоэффективной фильтрующей бумаги 12 месяцев (см. гл. VIII), то стоимость замены составит 35 ф. ст. в год.

К стоимости самих фильтров должна быть добавлена стоимость работ по замене, которая становится значительной, если осуществляется полная защита от возможной токсикации или облучения. Обычно стоимость замены фильтра с α-активностью составляет 2 ф. ст., и она мало зависит от размера фильтра. Стоимость работ по уничтожению также должна оцениваться. Если возможно сжигание фильтра, то стоимость уничтожения будет 10 пенсов на установку; стоимость захоронения фильтров в море или в землю на длительное время составляет от 7 до 15 ф. ст. в зависимости от того, уничтожается фильтр с корпусом полностью или только замененная среда.

Следовательно, общая стоимость замены фильтра со складчатой фильтрующей бумагой производительностью 1700 *м³/ч* составит 35 + 2 + 7 = 44 ф. ст.

Стоимость предфильтров

В гл. IV и VIII указывалось, что значительное снижение стоимости очистки может быть достигнуто при сочетании высокоэффективных фильтров с предварительной очисткой (табл. 10.2).

Таблица 10.2

Стоимость комбинированных установок и стоимость замены предфильтров

Тип фильтра	Производительность, *м³/ч*	Стоимость, ф. ст.	
		всего фильтра	замены предфильтра
Складчатый хлопко-асбестовый и стекловолокнистый предфильтр (в отдельных корпусах)	340	60	30
Складчатый хлопко-асбестовый и стекловолокнистый предфильтр (2 ступени в одном корпусе)	340	80	12
Фильтрующая бумага из стекловолокна и предфильтр, снаряженный матами из грубого стекловолокна (в отдельных корпусах, со сменной средой)	1700	110	15
Фильтрующая бумага из стекловолокна и предфильтр, снаряженный матами из грубого стекловолокна (отдельные «выбрасываемые» корпуса)	1700	65	25
Два фильтра с бумагой из стекловолокна и предфильтр с матами из грубого стекловолокна	1700	150—180	15

Оценим величину экономии в примере, приведенном в гл. VIII. Если предфильтр стоимостью 15 ф. ст. заменять один раз в 12 месяцев, то высокоэффективный фильтр стоимостью 35 ф. ст. будет служить 4 года и годовая стоимость без учета стоимости уничтожения составит (15 + $^{35}/_{4}$ ф. ст.), или 3,8 пенса на 1 *м³/ч* в год.

Грубоволокнистые предфильтры, обычно используемые для очистки приточного воздуха, могут стоить порядка 1,2 ф. ст. на 1000 *м³/ч*, или 0,3 пенса на 1 *м³/ч* в год, если срок их службы будет 12 месяцев. Однако эти фильтры не могут оказывать значительного влияния на сроки эксплуатации и стоимость замены основных фильтров вытяжной системы.

Сопротивление фильтров и стоимость энергии, потребляемой вентиляторами

Одним из способов продления сроков непрерывной эксплуатации фильтрующей системы является, очевидно, максимально допустимое увеличение сопротивления предфильтров перед их заме-

ной. Забивание пылью предфильтров будет экономически оправдываться до тех пор, пока стоимость энергии, потребляемой вентилятором на преодоление дополнительного сопротивления, будет меньше стоимости замены фильтров. Продолжив рассмотрение предыдущего примера, можно показать, что продление сроков эксплуатации фильтра производительностью 1700 *м³/ч* и стоимостью очистки 6,5 пенса на 1 *м³/ч* в год с одного года до полутора лет приведет к снижению расходов на очистку до 4,4 пенса на 1 *м³/ч* в год.

Мощность вентилятора, требуемая для перемещения данного объема воздуха, прямо пропорциональна общему развиваемому напору, и, следовательно, для нормальных значений к. п. д. вентилятора и двигателя стоимость электроэнергии может быть порядка 1,2 пенса на 1 *м³/ч* в год на каждые 25 *мм вод. ст.* сопротивления.

Из рассматриваемого примера следует, что при удлинении срока службы с одного года до полутора лет увеличение предельного значения сопротивления будет экономически оправдано, если величина прироста ΔP за это время не будет больше

$$\frac{(6,5-4,4)}{1,2}\cdot 25 \approx 44 \text{ мм вод. ст.}$$

При обсуждении кривых зависимости забиваемости для типичных фильтрующих материалов отмечалось, что сопротивление начинает расти особенно круто после накопления определенного количества пыли и, по-видимому, маловероятно, что работа в области резкого возрастания может быть экономически выгодной. При использовании обычного вентилятора производительность системы с переменным сопротивлением может поддерживаться на одном уровне с помощью регулирования дросселем.

Сопротивление системы будет постоянным в течение всего срока эксплуатации фильтров, так как увеличение сопротивления на фильтре будет компенсироваться уменьшением сопротивления на дросселе.

Более экономичная работа вентиляционной системы, очевидно, может быть достигнута при использовании вентиляторов с направляющим аппаратом или многоступенчатых осевых вентиляторов, а также путем изменения числа оборотов вентилятора, оснащенного многоскоростным двигателем. Регулирование производительности многоступенчатыми осевыми вентиляторами более экономично. Так, если средний перепад давления, преодолеваемый вентилятором, составляет 50 *мм вод. ст.*, то дальнейшая экономия приведет к снижению стоимости до 2,4 пенса на 1 *м³/ч* в год.

Первоначальная стоимость центробежного вентилятора с радиальным створчатым дросселем производительностью 34 000—51 000 *м³/ч* и с напором 100—200 *мм вод. ст.* не будет превышать 95 пенсов на 1 *м³/ч*, в тех же условиях стоимость многоходового

вентилятора составит 14 пенсов на 1 $м^3/ч$, а многоступенчатого осевого — 19,5 пенса.

Следовательно, ежегодная экономия на энергии позволит возместить повышенные первоначальные затраты в течение не более двух лет даже на самый дорогой многоходовой вентилятор. Таким образом, более сложные типы вентиляторов экономически более выгодны.

Стоимость использования местных укрытий

Использование местных укрытий в виде шкафов и камер на тех технологических операциях, которые характеризуются выделением высокотоксичных аэрозолей и требуют аспирации больших объемов воздуха, не дает значительного уменьшения общей стоимости вентиляции всего рабочего помещения. Однако устройство перчаточных боксов, расходы на сооружение которых довольно быстро возмещаются, позволяет значительно сократить затраты на вытяжную вентиляцию. Применение в боксах в качестве рабочей среды чистого воздуха с фильтрацией в замкнутом контуре также дает существенную экономию.

Стоимость очистки приточного воздуха

Фильтрация приточного воздуха создает более благоприятные условия для работы фильтров вытяжной системы и фильтров тонкой очистки. В основную стоимость очистки входят затраты на перемещение воздуха, вентилятор, фильтры и специальные устройства, гарантирующие от случайного поступления нефильтрованного воздуха.

В данном случае наиболее важным экономическим фактором является то, что весь поступающий в помещения воздух должен быть нагрет и затраты на это весьма велики (порядка 14 пенсов на 1 $м^3/ч$ в год).

Следовательно, первоочередной задачей является снижение количества поступающего воздуха до минимально допустимого. Если в соответствии с требованиями производственного процесса воздух должен быть очищен и в помещении должна поддерживаться высокая кратность воздухообмена (например, 10-кратный обмен вместо 0,5-кратного, необходимого для создания нормальных условий), желательно, чтобы большая часть воздуха участвовала в рециркуляции внутри помещения. Это позволит значительно снизить расходы на отопление.

В тех случаях, когда приточный общеобменный воздух, предварительно очищенный, используется для уменьшения пылевой нагрузки на фильтры вытяжной системы, маловероятно, что воздух, удаляемый этой системой, можно повторно направить в рабочие помещения даже после ультратонкой фильтрации.

Стоимость строительства зданий, оборудованных высокоэффективной фильтрацией

Здания, которые необходимо оборудовать тщательно сбалансированной управляемой вентиляцией и системами высокоэффективной очистки газообразных выбросов, имеют много конструктивных особенностей по сравнению с обычными промышленными помещениями: устройство специальных герметичных дверей и окон, шлюзование входа, специальная отделка поверхностей стен и полов, обеспечивающая их легкую дезактивацию и минимальное накопление пыли, устройство закрытых воздуховодов и вентиляционных камер для размещения фильтрующих установок, обеспечивающих их безопасную замену и т. д. Все это значительно увеличивает стоимость строительства таких зданий.

Для снижения расходов очень важно не предусматривать специального оборудования для помещений, не требующих специальной обработки воздуха (административные и обслуживающие помещения). Кроме того, необходимо принять все меры, способствующие уменьшению объема и площади помещений для фильтров и фильтровальных камер. Снижение габаритов очистных сооружений позволяет значительно сократить расходы на строительство.

Общая стоимость

Основным пунктом общих капитальных затрат является стоимость систем воздуховодов и фильтровальных помещений. Главные статьи эксплуатационных расходов составляют стоимость замены фильтров и стоимость энергии, потребляемой вентиляторами (без учета стоимости подогрева свежего воздуха).

Типичны следующие капитальные расходы для установок, принятых на сегодня в качестве лучших для обработки воздуха, содержащего радиоактивные частицы высокой активности (на 1000 $м^3/ч$), ф. ст.:

приточная вентиляция	300
вытяжная вентиляция, оборудованная фильтрами	1520
вытяжная вентиляция без фильтров	230

Ежегодные эксплуатационные расходы на удовлетворительно работающие фильтрующие установки составляют 137 ф. ст. на 1000 $м^3/ч$ без замены фильтров или 190 ф. ст. на 1000 $м^3/ч$ с учетом замены фильтров.

ЗНАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ

Состояние теории фильтрации

Современное состояние теории фильтрации волокнистыми фильтрами еще не позволяет использовать ее для количественных расчетов и технологических процессов изготовления фильтрующих

материалов. Правда, теоретически можно достаточно точно предсказать работу идеальных фильтров, однако технологи не могут их изготовить. Экспериментальные данные, накопленные за последние годы, способствовали дальнейшему развитию теории, позволяющей уже теперь довольно точно предсказывать конечные величины эффективностей улавливания и перепада давления для данной смеси волокон.

Можно надеяться, что дальнейшее развитие теоретических и экспериментальных исследований даже в направлении идеальных фильтров приведет к усовершенствованию фильтрующих материалов (их эффективности, пылеемкости, габаритов) и методов оценки работы фильтров по любым реальным аэрозолям.

Эффективность и размер частиц

В последнее время ведется широкая дискуссия о влиянии размеров частиц на эффективность их осаждения. Этот вопрос очень важен для многих практических применений. Например, при защите ядерных реакторов в аварийных условиях, когда размер образующихся аэрозольных частиц неизвестен, или при некоторых микробиологических процессах, когда размер частиц, подлежащих улавливанию, хорошо известен, но могли бы быть использованы более экономичные фильтры, если бы эффективность осаждения частиц такого размера была лучше изучена.

Для выяснения более глубоких количественных зависимостей эффективности от размеров частиц в настоящее время во многих лабораториях атомной и микробиологической промышленности ведется интенсивная работа и, безусловно, в этом направлении будут достигнуты значительные результаты. Сложность этой проблемы заключается в том, что очень много факторов одновременно влияет на это соотношение, например природа частиц, их форма, плотность, природа фильтрующего материала и скорость фильтрации. Из опубликованных работ следует, что в этом направлении предстоит провести еще большие экспериментальные исследования и чем больше непонятных фактов будет собрано и проанализировано, тем скорее будут найдены правильные принципиальные решения.

Эффективность и пылеемкость

Еще более сложные соотношения возникают, если при исследовании процесса фильтрации учитывать влияние накопленной пыли.

В настоящее время оценка требуемой эффективности улавливания фильтров производится по аэрозолям метиленовой голубой или хлористого натрия до использования фильтров. В гл. III и VIII показано, что эффективность зависит не только от размера частиц; она существенно возрастает по мере накопления пыли в фильтре, и это является очень важной практической характеристикой для

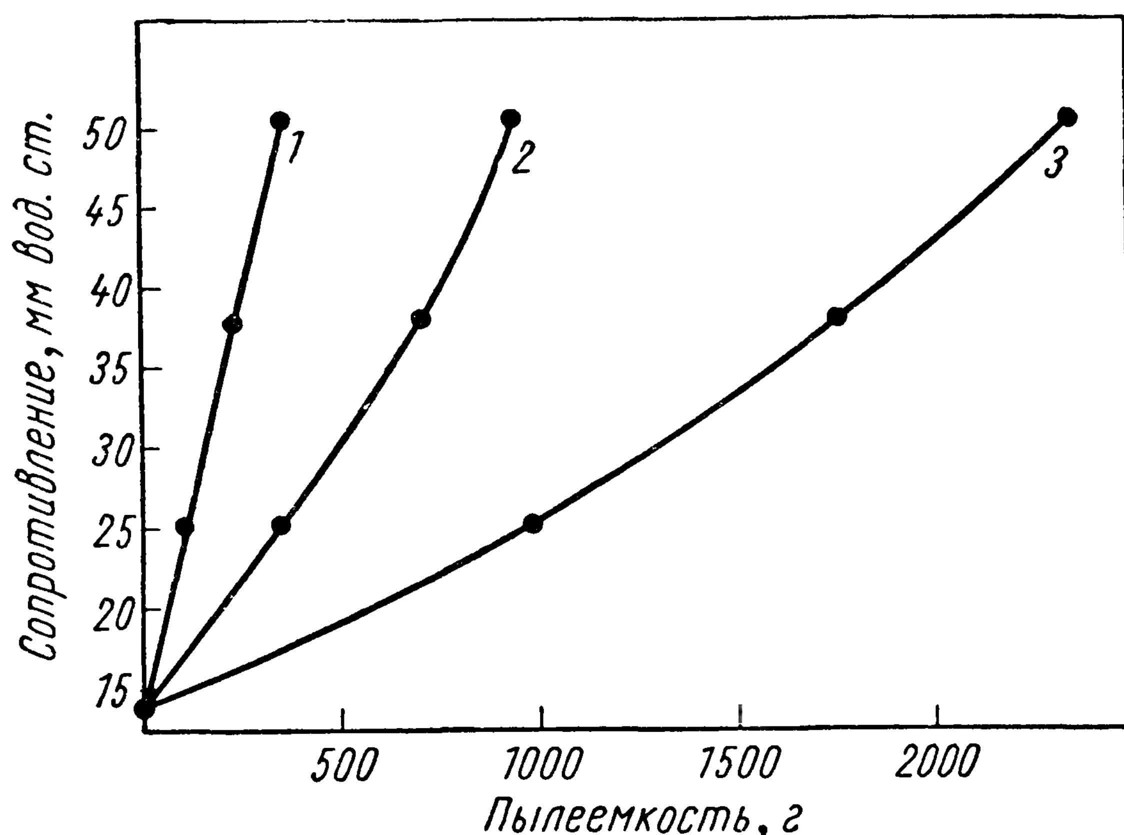
промышленных установок, тем более что характер влияния накопления пыли будет существенно зависеть от природы и размера аэрозольных частиц.

При оценке общей эффективности фильтров, усредненной за весь период его эксплуатации в реальных условиях, следует помнить, что промышленная установка может быть более рационально сконструирована, если заранее получить исходные данные по зависимости эффективности от пылеемкости для данного типа фильтров и аэрозолей. Поэтому необходимо более широко изучать зависимость эффективности от характера забивания фильтров различными типами пылей. Это окажет значительное влияние на экономику использования фильтров.

Безусловно, необходимо всегда учитывать назначение фильтра. Если он предназначен для обеспечения высокой эффективности очистки в течение всего срока эксплуатации, то сведения о влиянии накопления пыли на эффективность не обязательны. Однако и в этом случае данные о возможной степени улучшения эффективности фильтрации за счет предварительного нанесения незначительного количества пыли весьма ценны. В этом направлении уже имеются определенные достижения в отношении как твердых частиц, так и жидких, однако серьезного значения при использовании высокоэффективных фильтров это не имеет.

Характеристики пылеемкостей

Накопление пыли в фильтре влияет не только на эффективность очистки. Пылеемкость является одной из важнейших рабочих характеристик фильтров с точки зрения их экономичности. Вместе



Влияние размера частиц на пылеемкость высокоэффективной фильтрующей среды:

1 — аэрозоль NaCl с частицами размером 0,5 *мкм*; *2* — пыль с частицами размером 2,0 *мкм*; *3* — пыль с частицами 5,5 *мкм*. Производительность фильтра 1530 *м³/ч*, концентрация пыли 0,05 *мг/м³*.

с тем малая величина пылеемкости высокоэффективных фильтров, несомненно, является принципиальным недостатком, ограничивающим их широкое применение.

К настоящему времени накоплено достаточно большое количество данных по забиванию различных фильтрующих сред, но они относятся главным образом к аэрозолю метиленовой голубой или другим аэрозолям с частицами субмикронного размера. На практике редко встречаются подобные аэрозоли. В то же время пылеемкость очень резко зависит от типа и размеров пылевых частиц. На рисунке показано влияние типа пыли и размеров частиц на величину пылеемкости материала для предфильтров. Видно принципиальное изменение характеристик пылеемкостей фильтрующего материала с изменением спектра размеров частиц и типа пыли.

Необходимо проводить исследования в этом направлении не только для предфильтров, но и для фильтров тонкой очистки и особенно в случае их сочетания, так как очень важно знать дисперсный состав пыли, проникающей через предфильтр, и ее влияние на забивание конечного фильтра.

Ускоренные испытания на пылеемкость

Для получения в лабораторных условиях информации о пылеемкости фильтров в течение приемлемого промежутка времени очень важно разработать, если это возможно, строго стандартизованную методику ускоренных испытаний.

Методика ускоренных испытаний по аэрозолю метиленовой голубой, получаемому с помощью стандартного распылителя, была использована в лаборатории военно-химической защиты для сравнительной оценки фильтрующих материалов предфильтров и высокоэффективных фильтров. Этот аэрозоль и обычную атмосферную пыль улавливали одновременно и сравнивали распределение их частиц по размерам. Конечно, эти аэрозоли нельзя считать идентичными, однако результаты таких испытаний могут представлять интерес для косвенной оценки работы фильтров, работающих в условиях обычной атмосферной пыли. Запыленность воздуха в этих испытаниях составляла 16 $мг/м^3$; это позволяло забивать образец площадью около 26 $см^2$ в течение нескольких часов, хотя обычно для этого требуется многомесячная работа фильтра в реальной атмосферной пыли. Интересно отметить, что при использовании этого аэрозоля время предельного забивания высокоэффективной бумаги было примерно одинаковым как в комбинации с предфильтром, так и без него. Предфильтр, улавливая значительное количество поступающей в него пыли, пропускает частицы такого размера, которые вызывают наиболее быстрое забивание высокоэффективной бумаги.

В большинстве принятых сейчас стандартных методов испытаний не используются аэрозоли, которые бы удачно моделировали реаль-

ные промышленные пыли. Недавно Адлей и Вайсхарт* провели ускоренные испытания с пылью, собранной с поверхностей чердака, которая скопилась там в естественных условиях. Несмотря на то что собранная, а затем развеянная пыль не соответствовала истинному составу взвешенной в воздухе атмосферной пыли, эти испытания можно рассматривать как определенное достижение в разработке ускоренного метода испытаний.

Проблема ускоренных испытаний на пылеемкость остается еще нерешенной. Необходимо для получения аэрозолей разработать специальную аппаратуру, которая позволила бы работать с пылью различного типа и регулировать ее дисперсный состав. Степень сокращения времени проведения таких ускоренных испытаний должна быть обоснована.

Пылеобразование в технологических процессах

Характер влияния улавливаемых пылей на различные параметры работы фильтров можно определить в том случае, если известны с достаточной степенью достоверности свойства аэрозоля, для очистки которого используется эта конструкция фильтра. К сожалению, в этой области выполнено слишком мало работ и мы располагаем очень ограниченными сведениями о природе аэрозолей, возникающих даже в типовых технологических процессах (например, на операциях измельчения или механической обработки). Необходимо расширять объем исследований свойств аэрозолей, возникающих при всех типовых процессах опасных производств.

Особо стоит вопрос о необходимости различения опасной пыли и сопровождающей ее пыли, которую вообще не нужно улавливать. Такое различение важно в том случае, когда опасные и безвредные составляющие отличаются по прониканию через фильтры.

Испытание фильтров

Современное состояние методов испытаний фильтров описано в гл. VI, где подчеркивалось, что наиболее важными испытаниями являются определения эффективности фильтров по субмикронным аэрозолям. В настоящее время существует несколько вполне удовлетворительных методов испытаний для лабораторной оценки фильтрующих материалов и готовых образцов фильтров. Главная неразрешенная проблема — выбор лучшего метода испытаний или международная стандартизация одного из методов. Некоторую степень соответствия между результатами испытаний по аэрозолям NaCl и диоктилфталата установил Дорман. В настоящее время в Англии полагают, что испытания по аэрозолю хлористого натрия, обладаю-

---

* Adley F., Wischart D. Seventh AEC Air Cleaning Conference, Office of Technical Services. Washington, 1961.

щие большей чувствительностью, заслуживают серьезного рассмотрения в качестве возможного стандартного международного метода.

Однако более важными для практического использования фильтров являются испытания фильтрующих установок в реальных промышленных условиях. В этом отношении очень интересны попытки разработки таких испытаний в США.

Несмотря на то что технология изготовления фильтров, их лабораторные испытания и монтаж достаточно совершенны, нельзя быть уверенным, что при эксплуатации фильтрующей установки эффективность останется такой же, как намечалась вначале. При очистке высокоактивных или очень токсичных выбросов снижение эффективности или незначительные повреждения в фильтрах должны быстро определяться испытаниями в рабочих условиях.

Портативная установка с использованием аэрозоля диоктилфталата, разработанная в США, вполне подходит для таких испытаний (в Англии этот метод серьезно не рассматривался). На ряде микробиологических установок проводились испытания с введением в поток спор Bacillus Subtilis или фагов и последующим улавливанием их за фильтрами на пластинки. Этот метод испытаний весьма прост и дает хорошие результаты. Его можно применять для других установок, однако он требует специального приборного оснащения.

Интересное исследование было проведено в Гарвардской воздухоочистительной лаборатории с распылением водной суспензии флуоресцирующих веществ. С помощью распылителя легко ввести струю аэрозоля внутрь газохода перед фильтрами без применения сжатого воздуха. Коэффициент проскока может быть определен спектрофотометрически или другими прямыми физическими методами. Точное знание коэффициента проскока в таких испытаниях, по-видимому, необязательно.

ПРИМЕНЕНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

Иногда, исходя из высоких требований, предъявляемых к установкам, без тщательного анализа конкретных условий применяют дорогостоящие установки, без которых можно было обойтись. Это происходит еще и потому, что не учитываются конкретные характеристики высокоэффективных и дорогих фильтров. Так, например, в атомно-энергетических установках не обязательно устанавливать фильтры, которые обеспечивали бы в аварийных режимах такую же высокую эффективность, как и при нормальной работе. Чтобы подобных случаев было меньше, необходимо исследовать свойства аэрозолей, возникающих при различных обстоятельствах, например при возгорании радиоактивных металлов.

И прежде чем принять решение о конкретной установке фильтра определенного типа, надо ясно представлять обстановку в каждом случае. Весьма важно знать уровни допустимых величин остаточных концентраций после фильтров. В будущем величины макси-

мально допустимых концентраций, по-видимому, будут несколько возрастать с появлением новых производств (в старых отраслях промышленности более вероятно их снижение). Коэффициенты запаса, принимаемые в настоящее время при проектировании, также будут уменьшаться по мере накопления опыта. Все большую роль будет играть учет влияния размеров частиц. Например, в настоящее время имеется весьма мало данных о том, какой размер частиц многих широко распространенных пылей наиболее опасен. Этот вопрос еще не разрешен и применительно к производству фотоматериалов, но, по-видимому, требования удаления частиц весьма малого размера для создания чистой рабочей атмосферы в ряде производств являются иногда излишними.

Везде, где используются высокоэффективные фильтры для очистки аспирационных газов, в целях увеличения их сроков службы необходимо ликвидировать все источники образования нетехнологических аэрозолей, чтобы поддерживать минимальной величину отношения неопасных пылей к опасным.

Совершенствование первичных пылеуловителей

Совершенствование первичных грубоволокнистых пылеуловителей для очистки приточного воздуха и технологических газов является очень важным. Перспективными в ближайшем будущем первичными аппаратами являются также электрофильтры и скрубберы Вентури, так как они способны улучшить экономичность процесса улавливания тонких частиц.

Знание закономерностей зависимости эффективности пылеемкости от свойств улавливаемой пыли должно найти воплощение при разработке структуры фильтрующих материалов, предназначенных для специфических условий их использования. Очевидно, технология изготовления таких материалов, например с использованием волокон определенных размеров с заданной ориентацией, будет более сложной, чем применяемая сейчас.

Регенерация фильтров

Главными недостатками высокоэффективных фильтров являются их высокая начальная стоимость и низкая пылеемкость, приводящая к необходимости их частой замены. Если бы можно было соответствующее количество уловленной пыли удалить из фильтрующей среды, то это продлило бы сроки службы фильтров.

Регенерация — общеизвестная операция для большинства фильтров, но применительно к высокоэффективным волокнистым фильтрам нет никаких удовлетворительных технических решений. Некоторые исследования по регенерации фильтров с помощью ударных волн, генерируемых с помощью диафрагм, патронов или газовоздушных взрывов, были проведены в Гарвардской лаборатории очистки воздуха. Однако не удалось достигнуть таких результатов,

чтобы с удалением пыли из забитых фильтрующих материалов восстанавливалось сопротивление и сохранялась прежняя эффективность. Были также проведены исследования по использованию для этих целей ультразвука. Удаление пыли становится возможным, если она хорошо агрегирована и легко удаляется обратным потоком воздуха, подаваемым через перемещающиеся очищающие устройства.

Исследования в этом направлении представляют большой интерес. Их следует распространить на фильтрующие среды, применяемые в высокоэффективных фильтрах.

Повышение химической и физической стойкости

Применение высокоэффективных фильтрующих материалов, разработанных к настоящему времени, все еще ограничено определенными пределами температуры, давления, влажности и воздействием агрессивных сред. Интенсивно ведутся исследования по расширению температурных пределов, главным образом в направлении разработки новых видов неорганических волокон и повышения механической прочности и температуры плавления стеклянных волокон. Это особенно необходимо как для применения их в ядерно-реакторной технологии, так и для обеспечения защиты от огня. Увеличение прочности волокон расширит область допустимых перепадов давления на фильтрах и позволит применять их при повышенном давлении. Кроме того, по-видимому, упростится конструкция образцов, так как не надо будет проектировать специальную огнезащиту.

Изготовление фильтрующей среды из синтетических волокон позволит применять ее в различных агрессивных условиях. В этом отношении интересен опыт широкого применения в Советском Союзе материалов из синтетических волокон диаметром 1 *мкм*, причем корпус, рамки и разделители также изготовляются из пластмасс.

Повышение надежности и безопасности

Несмотря на то что сейчас фильтрация высокотоксичных пылей уже является сравнительно безопасным процессом и к настоящему времени уже созданы негорючие фильтры, все же имеются большие возможности существенного повышения температурных пределов работы фильтров и усовершенствования конструкции как составляющих элементов фильтров, так и отдельных частей систем для обеспечения равноценного сопротивления высокой температуре, которая может возникнуть при улавливании воспламеняющихся пылей. Механическая прочность всех высокоэффективных фильтров еще недостаточна, и это ограничивает их применение в системах, где возможны взрывные давления. Очевидно, что от промышленности следует ожидать дальнейшего усовершенствования фильтров или даже принципиально новых решений.

Расширение областей применения фильтров

Стоимость установок высокоэффективных фильтров пока еще высока, хотя заметно ее медленное снижение. Очень важно, что высокоэффективные фильтры начинают использоваться не только в атомной промышленности и микробиологии. Наиболее вероятно их применение для ультратонкой очистки воздуха или других рабочих газов в бурно развивающейся радиоэлектронной промышленности (при производстве и эксплуатации миниатюрных электронно-механических устройств, необходимых для счетно-вычислительных машин, управляемых снарядов и космических кораблей).

Развитие биохимической технологии также будет сопровождаться использованием высокоэффективной фильтрации для очистки от патогенных и модельных бактериальных аэрозольных частиц воздуха, подаваемого в аппараты и выходящего из них. Вероятно, следует обратить внимание проектировщиков современных больниц на проблему защиты от распространения инфекции, стерилизации и обеспыливания воздуха методами высокоэффективной фильтрации. Можно полагать также, что высокоэффективная фильтрация будет достаточно экономичной для применения в обычных отраслях промышленности, к которым предъявляются все возрастающие требования по охране воздушного бассейна.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к русскому изданию 3
Предисловие 5

Глава I. **Введение**. *П. Уайт, С. Смит* 7
Применение высокоэффективных фильтров 11
Литература 18

Глава II. **Природа аэрозолей**. *П. Уайт, С. Смит* 19
Основные свойства аэрозолей 19
Атмосферные и промышленные аэрозоли 24
Аэрозоли атомной промышленности. *К. Стюарт* 32
Воспламеняемость пылей. *П. Уайт, С. Смит* 48
Пробоотбор и измерения. *К Стюарт* 52
Литература 64

Глава III. **Теория фильтрации волокнистыми фильтрами** *Р. Дорман*. 66
Механизмы фильтрации 68
Применение теории к фильтрам 84
Экспериментальная проверка теории 87
Теория и эксперимент 102
Литература 103

Глава IV. **Фильтрующие материалы**. *Р. Дорман* 105
Важнейшие характеристики фильтрующих материалов 105
Историческая справка о развитии фильтров 113
Возможность использования других материалов для промышленных фильтров 124
Фильтры грубой очистки 130
Сравнение характеристик широко используемых материалов . . . 132
Фильтрация глубокими стационарными и псевдоожиженными зернистыми слоями 134
Пробоотборные материалы 135
Литература 141

Глава V. **Конструкции фильтров.** *К. Малкастер, Дж. Окленд* . . . 142
Изготовление и устройство фильтров 146
Монтаж фильтров 157

Глава VI. **Технические условия на фильтры и методы их испытания** *К. Малкастер, Дж. Окленд.* 164
Контрольные и типовые испытания. 166
Испытания фильтров на эффективность 166
Другие виды испытаний 173
Механические испытания 175
Испытания фильтров на огнестойкость 179
Технические условия 180
Приложение I. Технические требования на фильтрующий материал. 182
Приложение II. Приемочные испытания готовых образцов
Литература. 183

Глава VII. **Вспомогательное оборудование для высокоэффективной фильтрацин.** *П. Уайт, С. Смит* 184
Предварительная очистка воздуха от пыли 184
Электрофильтры. 196
Фильтрация. 200
Удаление паров. *Д. Рилей.* 205
Литература. 216
Глава VIII. **Основы проектирования фильтруюших установок** *П. Уайт, С. Смит.* 218
Очистка приточного воздуха. 219
Очистка технологических выбросов. 224
Техника безопасности. 245
Расположение и монтаж фильтров. 249
Литература. 251

Глава IX. **Обслуживание фильтрующих установок.** *Дж. Поттер* 252
Общие положения. 252
Подача воздуха. 253
Местные вытяжные устройства. 254
Главная вытяжная система. 255
Вытяжные трубы. 256
Шум. 257
Вентиляторы. 259
Приточные и вытяжные вентиляционные системы 262
Расположение фильтров, вентиляторов и демпферов 265
Контрольно-измерительные приборы. 269
Обеспечение безопасности. 270
Типичные схемы фильтрующих установок 272
Работа и эксплуатация установки. 276
Измерение воздушного потока. 277
Эксплуатация установки. 279

Техническое обслуживание. 281
Экономические факторы установки фильтров. 294

Глава X. **Экономика и перспективы развития фильтров**. *П. Уайт, С. Смит*. 295

Экономические показатели высокоэффективной фильтрации . . . 295
Знание процессов фильтрации. 300
Применение высокоэффективных фильтров. 305

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ОЧИСТКА ВОЗДУХА

Редактор Т. П. Калюжная
Художественный редактор А. С. Александров
Технический редактор Е. И. Мазель
Корректор *Н. А. Смирнова*

Сдано в набор 11/V 1967 г.
Подписано в печать 29/VII 1967 г.
Бумага 60×90/16, типографская № 2
Усл. печ. л. 19,5. Уч.-изд. л. 18,55
Тираж 3500 экз. Заказ изд. 1859. Цена 1 р. 43 к.
Атомиздат, Москва, К-31, ул. Жданова, 5/7
Зак. тип. 1356

Московская типография № 4 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Москва, Б. Переяславская, 46